



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Институт радиоэлектроники
и информационных
технологий

В. М. АНТИМИРОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Часть 2

СОЗДАНИЕ БЦВС

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. М. Антимиров

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

Часть 2

СОЗДАНИЕ БЦВС

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом УрФУ
для студентов, обучающихся по программе магистратуры
по направлению подготовки 220400 — Управление
в технических системах

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2015

УДК 681.51:629.7(042.4)

ББК 39.62-5-05

A72

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. кафедры «Электрические машины» УрГУПС *Б. С. Сергеев*; канд. техн. наук, зам. ГД по РКТ АО «НПО автоматики» *Л. Н. Бельский*

Научный редактор — зам. зав. кафедрой *В. В. Телицин*

Иллюстрации на обложке предоставлены пресс-службой «НПО автоматики»

Антимиров, В. М.

A72 Проектирование аппаратуры систем автоматического управления : учебное пособие : в 2 ч. Ч. 2 : Создание БЦВС / В. М. Антимиров. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 72 с.

ISBN 978-5-7996-1555-0 (ч. 2)

ISBN 978-5-7996-1553-6

Во второй части учебного пособия приводятся основные технические решения по реализации аппаратуры систем автоматического управления (САУ) и их основного звена — бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) и систем (БЦВС), работающих полностью в автономном режиме в экстремальных условиях. Приводятся технические решения по архитектуре и структуре вычислительных систем, сформулированы основные принципы обеспечения и повышения надежности БЦВС. Для оценки качества таких систем приведена функция технической эффективности. Рассмотрены принципы и направления повышения производительности БЦВС.

Пособие может быть полезно студентам электротехнических специальностей, преподавателям технических вузов, а также специалистам научно-исследовательских и проектных институтов.

Библиогр.: 24 назв. Рис. 22.

УДК 681.51:629.7(042.4)

ББК 39.62-5-05

ISBN 978-5-7996-1555-0 (ч. 2)

ISBN 978-5-7996-1553-6

© Уральский федеральный университет, 2015

1. Развитие БЦВС

Все основные характеристики, а также сама возможность создания бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) и систем (БЦВС) на их основе существенно определяются имеющейся и создаваемой элементной базой. По сути, сам процесс создания БЦВМ является процессом создания элементной базы. Рассмотрим этапы развития БЦВС с учетом создания новых поколений элементной базы.

В развитии БЦВС НПОА с учетом применяемой элементной базы можно выделить шесть поколений.

ПЕРВОЕ ПОКОЛЕНИЕ (1965–1970 гг.) было создано на основе бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ), которые назывались просто по своим порядковым номерам разработки. Это были ЦВМ3 и ЦВМ4. ЦВМ3 была создана для системы управления изделием 4К–18, а ЦВМ4 — для изделия 4К–75. Особенности структуры и архитектуры первых БЦВМ и первых БЦВС рассмотрим на примере ЦВМ3.

При разработке первых БЦВМ на предприятии, да и в стране, не было опыта по введению цифровых вычислительных машин в состав систем управления (СУ) ракет-носителей (РН). Системы управления РН были в основном аналоговыми и состояли из двух контуров:

- контура управления стабилизацией;
- контура управления дальностью.

Необходимость введения в состав СУ цифровой вычислительной машины была вызвана объективными причинами. В комплексе 4К–18 был введен режим самонаведения на движущуюся цель, которая опознавалась системой обнаружения радиолокационных станций кораблей и в первую очередь

авианосных соединений. По информации системы обнаружения необходимо было провести расчет параметров движения и изменить траекторию. Эти расчеты могла выполнить только БЦВМ. К комплексу 4К–75 были предъявлены повышенные требования по точности выведения полезной нагрузки. Для повышения точности путем компенсации ошибок, связанных со стартом с подвижного основания, а также ошибок бортовых гироскопических систем в состав СУ было введено астровизирующее устройство. В определенный точно известный момент времени определялись видимые угловые координаты навигационных звезд, по которым можно было определить ошибку фактического углового положения РН относительно расчетного и ввести поправки в траекторию движения. Эти расчеты по коррекции траектории могла выполнить тоже только БЦВМ. Таким образом, необходимость введения БЦВМ была обусловлена требованиями проведения в процессе полета расчетов параметров движения по информации, полученной в процессе полета от дополнительных подсистем.

К моменту начала разработки первых БЦВМ у разработчиков Научно-производственного объединения автоматики (НПОА) был опыт создания и внедрения в состав СУ цифровых устройств. В частности, для работы в контуре управления для формирования требуемой траектории полета и выдачи команд на исполнительные органы изделия вместо шагового двигателя был создан цифровой автомат, который назывался *счетно-решающий прибор автомата дальности* (СРПАД). При этом в контуре управления стабилизацией работало устройство аналогового типа — *счетно-решающий прибор автомата стабилизации* (СРПАС). Этот прибор, хоть и назывался «счетно-решающим», был реализован как аналоговое устройство. Необходимо отметить, что контур управления стабилизацией, несмотря на быстрое развитие цифровых вычислительных устройств, достаточно длительное время оставался аналоговым. Причиной этого, помимо здравого консерватизма разработчиков алгоритмов управления РН, была также плохая на-

дежность первых электронных вычислительных машин общего назначения (ЭВМОН), ремонт которых шел практически непрерывно. Так, например, при эксплуатации в середине 60-х годов прошлого века первых ЭВМ типа «Урал» в Уральском политехническом институте ежедневный запуск ЭВМ начинался с ремонта, который в течение часа велся заменой отказавших блоков. Поэтому решение задачи контроля и диагностики было крайне важным, что, к сожалению, затемнило решение основной проблемы создания БЦВМ, а именно обеспечения высокой надежности. Замена решения проблемы обеспечения надежности решением задачи диагностики отказов надолго стала слабым местом в создании ЭВМ общего назначения и по наследству перешла к специализированным вычислительным средствам, входящим в состав наземных и корабельных систем управления. Для последних это было оправдано, так как в отличие от бортовых систем их аппаратура могла ремонтироваться, для чего имелся комплект запасных элементов (приборов, блоков и модулей). Уровень замены определялся эффективностью и глубиной диагностики. Такая возможность несколько расслабляла разработчиков этих систем, поэтому продолжение отработки систем на объектах заказчика нередко имело место, что исключалось для БЦВМ, для которых обеспечение безотказности, как в основной работе, так и при хранении, было главной задачей.

При выборе архитектуры первой БЦВМ — ЦВМЗ — были рассмотрены известные решения, выработанные создателями первых ЭВМОН. Кроме того, использовался опыт и знания специалистов НПОА, приобретенные в процессе создания СРПАД. В результате архитектура ЦВМЗ заимствовала некоторые решения, примененные в ЭВМОН. Такими решениями были наличие запоминающего устройства, а также вычислительного устройства (процессора), реализующего программу, записанную в виде команд, размещенных в запоминающем устройстве. Для обмена с внешними устройствами в систему команд процессора были введены специальные команды при-

ема информации (ПИ) и выдачи (списывания) информации (СИ). Прием и списывание информации производились последовательным кодом путем сдвига информации в арифметико-логическом устройстве (АЛУ) процессора, который во время обмена с внешними устройствами не мог выполнять никаких других операций. Основным отличием от ЭВМОН в реализации размещения команд было то, что они хранились не в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ), а в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ). Это отличие было обусловлено тем, что в процессе эксплуатации БЦВМ нет необходимости изменять программы. В наследство от СРПАД первой БЦВМ достался принцип построения устройства управления процессора на основе жесткой схемной логики. Это, с одной стороны, обеспечивало высокое быстродействие выполнения команд, но, с другой стороны, практически исключало возможность оперативного развития (расширения) системы команд процессора, так как для введения новых команд требовалась серьезная схемная переработка аппаратуры. При этом необходимо отметить, что система команд ЦВМЗ была достаточно полной и включала в свой состав помимо рядовых операций типа сложения, логических и операций перехода быстрые операции умножения и деления.

Для ЦВМ4 была сделана попытка реализовать устройство управления на основе микропрограммного ЗУ. Однако из-за больших аппаратурных затрат на реализацию отдельного запоминающего устройства для микропрограмм они были размещены совместно с рабочими программами в основном ПЗУ. Такое расположение кодов микрокоманд не позволило в полной мере использовать преимущества микропрограммного построения устройства управления БЦВМ и полноценное применение микропрограммное управление нашло в БЦВМ только начиная с третьего поколения (ЦВМ7 и следующие). Всего в системе команд было 14 операций, которые благодаря схемной реализации устройства управления были достаточно короткими. Например, операция сложения двух чисел, разме-

шенных в ОЗУ, с отсылкой результата в ОЗУ выполнялась за 4 микросекунды. Умножение выполнялось за 12 мкс, деление — за 14 мкс, операции условного и безусловного перехода выполнялись за 4 мкс, т. е. быстродействие при выполнении арифметических и логических операций было достаточно высокое. Значительно хуже обстояло дело с операциями обмена, в которых на выдачу и прием последовательным кодом на каждый бит затрачивалось 4 мкс. В результате прием или выдача одного 16-разрядного слова занимали 64 мкс. Такое быстродействие определялось быстродействием внешних подсистем — источников и потребителей информации.

Учитывая сложную систему адресации операндов, когда в команде и ее адресе содержались адреса и источника, и приемника информации, в систему команд ЦВМЗ были введены операции групповой пересылки (переадресации) данных из одной зоны ОЗУ в другую. Была введена «смешная» операция траты времени, во время выполнения которой никаких действий с данными не производилось, а процессор просто простаивал заданное в команде количество тактов и приступал к выполнению следующей команды только после окончания операции траты. Операция траты широко использовалась в двух случаях. В первом она обеспечивала подгонку начала операций обмена (ПИ и СИ) в строго определенные такты относительно начала цикла программы, которые должны быть кратны 16. ЦВМЗ работала в 16-разрядной шкале, и обмен с внешними устройствами выполнялся также 16-разрядным последовательным кодом. Для распределения списываемой информации по выходным устройствам и формирования входной информации в формате 16-разрядного кода дополнительно к процессору был введен преобразователь кодов (ПРК), который, распределяя данные по внешним устройствам, частично помогал процессору выполнять обмены. Для этого он имел собственное устройство управления, реализованное на основе 16-разрядного счетчика. Наличие в ПРК собственного тактирующего устройства требовало начала операций обмена процессором в строго определенный такт работы, кратный 16.

Задачу установки требуемого времени начала операций обмена и помогала решить операция траты времени.

Вторым применением операции траты было формирование нужной длительности цикла выполнения программ. Цикл фиксированной длительности был нужен для организации вычислений в реальном масштабе времени, которое считалось в циклах программы БЦВС с опорой на стабильность тактового генератора.

Особенностью создания первых БЦВМ было то, что базовые элементы для построения цифровых устройств разрабатывались на предприятии и изготавливались в собственном производстве на основе дискретных компонентов — диодов, резисторов, конденсаторов, ферритовых элементов и транзисторов.

Для цифровых блоков были созданы два типа логических элементов:

1. Динамический триггер (ДТ), содержащий транзисторный усилитель, на входе которого в качестве элемента памяти устанавливалась линия задержки на LC звеньях. Чтение состояния триггера осуществлялось питанием транзистора усилителя от импульсного напряжения, при подаче которого на выходе усилителя появлялась информация, поступающая на дальнейшую обработку в диодно-резисторную логику.

2. Ключевой усилитель (КУ), задачей которого являлось усиление сигналов, прошедших логическую обработку на диодно-резисторной логике или после динамического триггера. Этот усилитель выполнял одновременно и функцию инвертирования сигнала.

Запитка динамического триггера осуществлялась от синхронизирующих импульсов, формируемых кварцевым задающим генератором (КЗГ). Эти импульсы являлись, по сути, тактовыми и шли с приходом около 4 мкс. Этот период определялся выбором кварцевого резонатора с частотой, кратной 2, для упрощения задачи деления частоты. Наиболее близким к требуемому значению оказался резонатор с номиналом частоты 256 кГц. Длительность периода являлась важным параметром, так как

входила в расчет реального времени работы системы управления. Расчет времени как параметра велся путем подсчета программных циклов решения задач управления. Длительность цикла формировалась из времени выполнения команд процессора БЦВМ, а длительность выполнения команд указывалась в количестве тактов. Таким образом, нестабильность работы тактового генератора БЦВМ непосредственно входила в ошибку расчета одного из основных параметров — текущего времени работы системы управления и, как следствие, нестабильность тактового генератора входила составляющей в основную характеристику работы системы управления — точность доставки полезной нагрузки в заданную точку или район.

Структура любого цифрового блока содержала ДТ, диодно-резисторную логику (ДРЛ) и ключевой усилитель (КУ), выполняющий одновременно функцию инверсии (см. рис. 1.1).

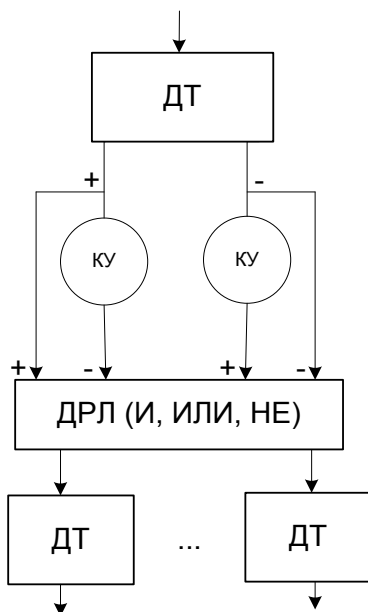


Рис. 1.1. Обобщенная структура системы логических элементов цифровых блоков

Для запоминающих устройств использовались ферритовые сердечники: для ОЗУ — многоотверстевые пластины, для ПЗУ — ферритовые кольца. Электроника ЗУ набиралась на дискретных элементах. Таким образом, основу ЭРИ первых БЦВС составляли дискретные элементы — диоды, транзисторы, конденсаторы, резисторы и ферритовые сердечники различного конструктивного исполнения.

Разработка ЦВМ3 и бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК) велась в лаборатории, которой руководил В. Д. Трифонов. Основными участниками разработки были Г. Н. Зубарева, Н. Н. Безбабный, Л. Е. Лекант, В. С. Калганов, Б. В. Тюрнин, Ю. Н. Агеев, В. Пивоваров, В. Аникин, П. С. Шабашов и пришедший в лабораторию после окончания УПИ молодой специалист В. М. Антимиров.

Разработка ЦВМ4 и соответствующего БЦВК велась в лаборатории К. Д. Табачника. Основными разработчиками были А. А. Турченко, А. А. Ануфриев, В. А. Зимин, К. И. Кутуков и др.

Как уже отмечалось ранее, введение БЦВМ в состав СУ происходило с большим недоверием к надежности их работы. Для выполнения одного из основных требований к надежности СУ — обеспечения работоспособности при одной возможной неисправности (ОВН) — было принято решение подключить выходы БЦВМ к исполнительным устройствам через узел мажоритарии (УМ). Структура резервированной БЦВС с мажоритарией выходных сигналов БЦВМ приведена на рис. 1.2.

Для организации такого резервирования вместо одной БЦВМ, необходимой для решения функциональных задач, устанавливалось три БЦВМ. С целью минимизации затрат оборудования УМ устанавливался в шине выдачи информации последовательным кодом на внешние устройства. Такое его расположение сокращало количество элементов, необходимых для построения узла мажоритарии. Однако для правильной работы узла мажоритарии требовалась синхронная и синфазная работа всех трех БЦВМ. Для обеспечения такой работы на все БЦВМ подавались сфазированные синхроимпульсы, фор-

мируемые КЗГ. Поскольку синхроимпульсы вырабатывались в одном генераторе и поступали на выход через индивидуальные буферные усилители, идентичные для всех трех выходов, несинфазность синхроимпульсов БЦВМ составляла единицы наносекунд, что обеспечивало правильную работу устройства мажоритации, но выдвигало очередную проблему, которой явилась необходимость нейтрализовать возможную неисправность в общей части КЗГ. Эта проблема, как показало время, оказалась достаточно сложной. Ее решение было найдено значительно позже — задача нейтрализации отказов в КЗГ была решена только при создании ЦВМ7.

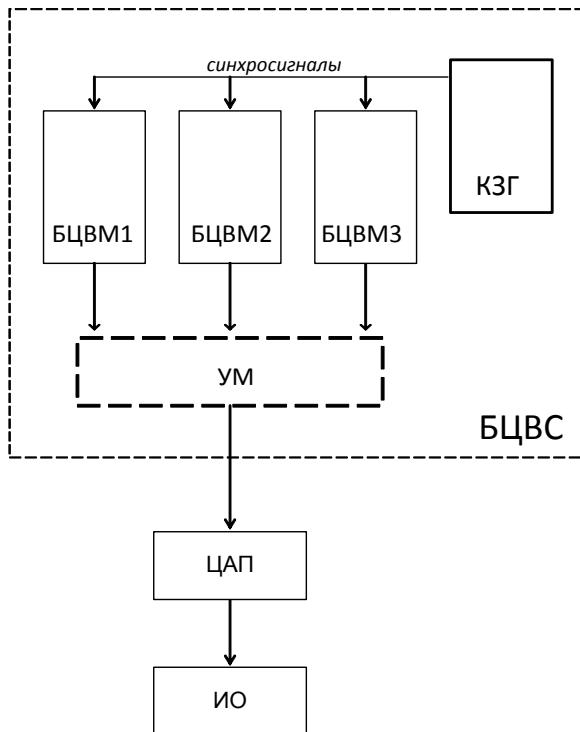


Рис. 1.2. Структура резервированной БЦВС с мажоритацией выходных сигналов БЦВМ

Таким образом, задача повышения надежности привела к необходимости перейти от одной БЦВМ к вычислительной системе, содержащей функциональную часть — собственно БЦВМ и общесистемную часть в виде устройства мажоритации и КЗГ. Общесистемная часть никаким образом не участвовала в решении функциональных задач, а обеспечивала только повышение надежности. Необходимо отметить, что КЗГ нес также и функциональную нагрузку, обеспечивая формирование бортового времени.

Таким образом, уже первые БЦВМ создавались как бортовая вычислительная система (БЦВС), содержащая функциональную часть, обеспечивающую решение задач управления, и общесистемную часть, необходимую для повышения надежности.

Необходимо отметить, что шло непрерывное совершенствование как функциональной части для обеспечения решения непрерывно возрастающего объема задач, так и общесистемной части. Уже в процессе эксплуатации первых БЦВС возник вопрос о повышении полноты использования дополнительно введенной аппаратуры. По сути, дополнительными относительно минимально необходимой для решения задач аппаратуры были еще две БЦВМ и общесистемное оборудование. Было принято решение максимально полно использовать введенную избыточность. С целью дальнейшего повышения надежности узел мажоритации был заменен на переключатель каналов (ПК) БЦВМ. Команды на переключение подавались с устройства контроля [1], подключенного к выходным шинам БЦВМ. Структура резервированной БЦВС с выходных шин БЦВМ приведена на рис. 1.3.

К БЦВК предъявлялись жесткие требования по минимизации массы и габаритов аппаратуры, поэтому они выполнялись в виде единой сборки, закрытой металлической крышкой, которая повышала защищенность от внешних электромагнитных полей и герметичность для перевозки разными видами транспорта, включая самолет.

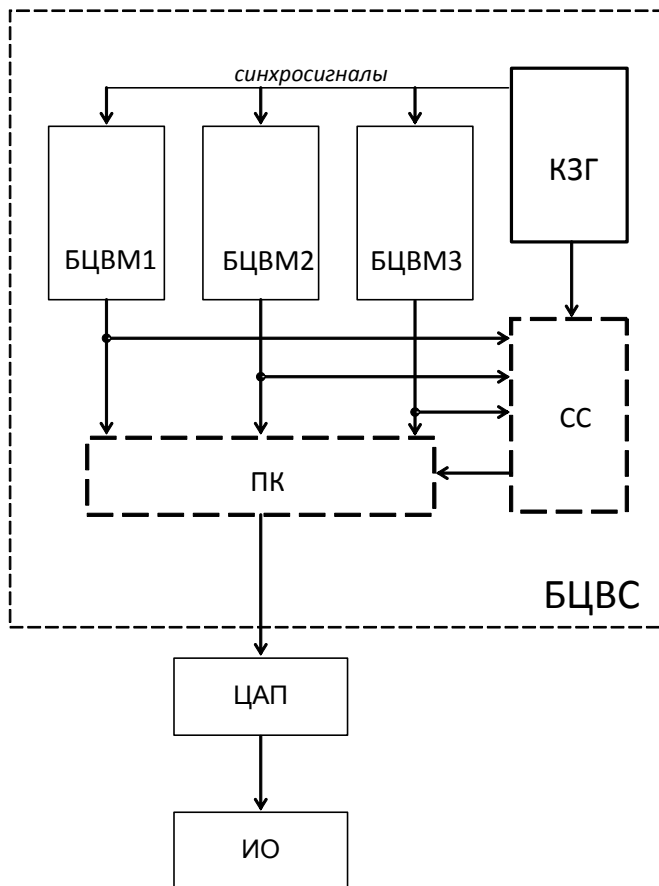


Рис. 1.3. Структура БЦВС с переключением резерва БЦВМ

КО ВТОРОМУ ПОКОЛЕНИЮ относятся БЦВС, построенные на основе ЦВМ6.

Особенностью этого поколения являлось применение твердотельных интегральных логических элементов группы «И», «ИЛИ», «НЕ». Необходимо отметить, что была предпринята попытка по аналогии с предыдущим поколением

создать собственную группу логических элементов. Эта работа началась в лаборатории Ю. А. Филимонова, когда на основе дискретных компонентов (диоды, транзисторы, резисторы) собирались логические элементы «И», «ИЛИ», «НЕ», предназначенные для создания ЦВМ5. Эта работа оказалась неудачной и ЦВМ5 на логических элементах собственного производства так и не появилась. Для создания ЦВМ были использованы появившиеся первые твердотельные микросхемы (ТМС), в частности это были ИС серии 106, изготавливаемые по технологии ТТЛ ВНИИЭТ (г. Воронеж). На этих ИМС была создана впервые в стране ЦВМ6, которая успешно была запущена в серийное производство на радиозаводе в г. Бресте. Для запоминающих устройств ЦВМ6 использовались те же компоненты, что и для БЦВС первого поколения. Основными участниками разработки были В. К. Мухамедеева, Н. Н. Курников, А. П. Петухов, С.А. Румянцев, В. И. Шульман, В. Н. Оськина, В. Н. Бизяева, В. А. Шаповалов, А. Д. Мих, В. Н. Крамаренко, Л. А. Зыкин, А. И. Сафин, В. М. Антимиров и др.

Структура БЦВС этого поколения в основных чертах повторяла структуру БЦВС предыдущего поколения. Для повышения надежности устанавливались три синхронно работающие БЦВМ, выходные шины которых переключались по сигналам устройства контроля, основанного на схемах сравнения. Новым было объединение системного оборудования (КЗГ и переключателя каналов со схемами сравнения) в виде отдельного прибора, получившего название «диспетчирующее устройство комплекса» (ДУК). Разработка БЦВК на основе ЦВМ6 велась в лаборатории Е. В. Самсонова. Основными разработчиками были В. Ф. Кирпичев и Н. Н. Субботин. Кроме того, на основе этой ЦВМ было создано несколько вычислительных систем в бывшей лаборатории К. Д. Табачника, которой руководил В. А. Зимин.

ТРЕТЬЕ ПОКОЛЕНИЕ (1965–1975) представляет ЦВМ7 (Малахит 1). Элементная база третьего поколения являлась естественным развитием элементов второго поколения.

Для логических устройств использовались также твердотельные микросхемы с тем отличием, что были применены ИМС с меньшим энергопотреблением. Был осуществлен переход от ИС серии 106 к ИС серии 134, изготавливаемой также по технологии ТТЛ. Эта разработка выполнялась по инициативе начальника отдела В. Ф. Мельникова в лаборатории Э. К. Зубарева. Основными разработчиками были В. К. Передерий, А. И. Комарова, В. Овчинников, В. Десятков, Н. А. Дунаев, И. А. Вилесов и др.

Вычислительная система на основе ЦВМ7 создавалась в лаборатории В. Д. Трифонова. Основными разработчиками были В. М. Антимиров, Л. К. Бревнова, Т. В. Коробейщикова, Н. Н. Безбабный, В. С. Калганов, Ю. Н. Агеев, Б. В. Тюрнин, М. В. Смирнова, Л. П. Александрова, Т. В. Орлова и др.

Уменьшенное энергопотребление микросхем позволило сделать революционный шаг, а именно перейти к применению бескорпусных ИС серии 734, устанавливаемых в микросборки.

Для третьего поколения БЦВС основной особенностью явилось применение бескорпусных интегральных микросхем.

В элементной базе запоминающих устройств также произошли значительные изменения. В лаборатории Л. М. Гутина было разработано ОЗУ, выполненное на тонких цилиндрических магнитных пленках (ЦТМП) с электроникой, установленной в микросборки. В лаборатории А. И. Кузнецова было разработано ПЗУ, в котором впервые были применены П-образные ферритовые сердечники с «прошивкой» информации в виде жгутов. Электроника ПЗУ также была выполнена в виде микросборок. Такое сочетание бескорпусных ЭРИ, устанавливаемых в микросборки, применение ЦТМП и ПЗУ с малым энергопотреблением позволило получить высокие удельные характеристики. Это обеспечило широкую применимость ЦВМ7, которая помимо использования в бортовых

системах управления изделий ЗМ–65, ЗМ–40, темы «Овал» была применена в корабельной части системы управления, что позволило заметно разгрузить корабельную цифровую вычислительную систему, разрабатываемую ЦНИИ «Агат». БЦВС 3-го поколения по совокупности параметров (энергопотребление, масса, габариты, производительность и информативная емкость) практически на порядок превосходила бортовые ЦВМ отечественного производства, созданные в это время на предприятиях отрасли в г. Москва (НПО АП) и г. Харьков (Электроприбор, в настоящее время — Хартрон).

Принципиальным отличием от предыдущего поколения и особенностью структурной реализации ЦВМ7 было модульное построение. Сформировавшиеся как функциональные модули уже в первых БЦВМ процессор и запоминающие устройства здесь приобрели и конструктивную завершенность.

Впервые в практике создания БЦВМ структурно было выделено устройство обмена [2]. С процессора убрали задачу приема и выдачи в последовательном коде, возложив эту задачу на устройство обмена (УО), что существенно повысило производительность БЦВМ. Обмен между процессором и УО осуществлялся в параллельном коде с приемом данных через прерывание. УО получало команду управления, содержащую адрес и код частоты обмена с соответствующим внешним устройством, так как периферийные устройства имели различное быстродействие при обмене. Для повышения надежности были сформированы модули ОЗУ, ПЗУ, процессор и УО (см. рис. 1.4). Модули были связаны через коммутаторы [3]. Коммутаторы имели два входа: первый — от своего канала, второй — от выхода соседнего идентичного коммутатора. Выход коммутатора был подключен ко входу другого функционального модуля своего канала и входу аналогичного коммутатора соседнего канала, что обеспечило каскадное наращивание резервирования модулей.

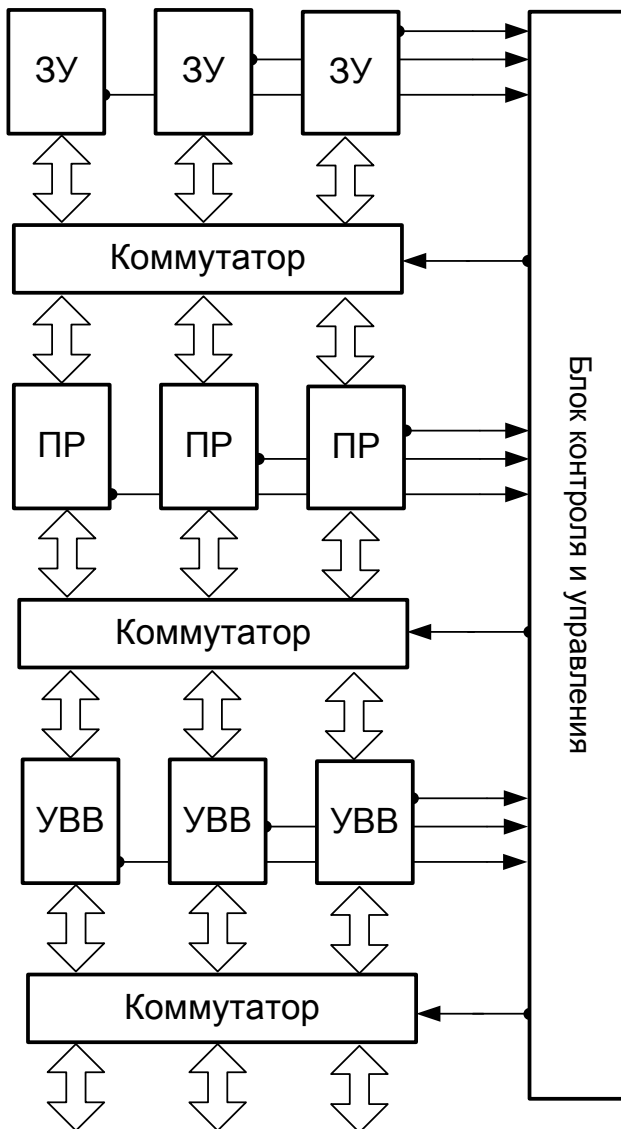


Рис. 1.4. БЦВС с резервированием на уровне модулей

Важнейшим принципиальным решением было введение оперативного аппаратного контроля работы каждого модуля. С этой целью в каждый модуль (процессор, ОЗУ, ПЗУ, УО) была введена избыточность в виде дополнительных разрядов и схем свертки, обеспечивающих контроль правильности преобразований данных по «mod3». Для фиксации сигналов неисправности в общесистемную часть был введен регистр состояний. Обработка выходов этого регистра производилась жесткой схемной логикой, формирующей сигналы на переключение модулей, фиксируемые в регистре управления. В каждом канале были свои регистры, но схемная логика была выполнена так, что при чтении их состояния в процессор информация имела однозначное представление для программной обработки. Оба регистра были программно доступны. Появление любого разряда в регистре состояний формировало сигнал прерывания. Помимо аппаратного контроля модулей были оставлены традиционные схемы сравнения выходной информации, сигналы которой также поступали в регистр состояний. По программе процессора можно было послать код в регистр управления и сформировать правильно работающую БЦВМ из исправных модулей разных каналов посредством коммутаторов. При этом обнаружилась проблема, связанная с увеличением времени передачи информации между модулями из-за дополнительных задержек на элементах коммутаторов при передаче информации из канала в канал, хотя в своем канале временная диаграмма была реализована таким образом, что наличие коммутатора не увеличивало время выполнения команд.

1. Принципиально была изменена система формирования синхронизирующих импульсов. Вместо единого задающего генератора в каждый канал по предложению Ю. В. Ерилова и В. М. Антимирова был введен собственный задающий генератор, а синхронность работы каналов обеспечивалась запуском сетки синхроимпульсов от стартовых импульсов, фазирование которых обеспечивалось отдельной схемой, рабо-

тающей с использованием принципа мажоритации. Все это усложнило общесистемную часть, но позволило решить проблему ОВН для КЗГ. Кроме того, введение формирователя сетки синхроимпульсов индивидуально для каждого канала позволило решить проблему задержек на коммутаторах, для чего был введен режим понижения частоты работы, который был реализован вначале делением частоты, а в дальнейшем — изменением частоты генератора. Включение этого режима производилось по программе записью соответствующего разряда в регистр управления.

2. Введение индивидуального аппаратного контроля, переключения модулей значительно увеличило дополнительные затраты аппаратуры, направленные на повышение надежности, но позволило принципиально решить задачу повышения гибкости общесистемного оборудования путем обеспечения программного доступа к общесистемной части аппаратуры [4]. С ЦВМ7 началась эпоха использования для повышения надежности алгоритмов и программ, которые стали неотъемлемой частью БЦВС.

По аналогии с предыдущим поколением все общесистемное оборудование было вынесено в ДУК.

Принципиальным отличием БЦВС этого поколения явилось введение системных программ управления структурой через общесистемное оборудование, размещенное в ДУКе. Появилась и была реализована возможность организации параллельного счета разных задач, что позволило расширить объем решаемых задач без разработки новой БЦВМ. Все это сделало структуру адаптивной к отказам и вычислительным перегрузкам, т. е. придало системе принципиально новое качество, но привнесло ряд новых проблем, связанных с необходимостью разработки алгоритмов и программ операционной системы, обеспечивающих адаптацию.

Необходимость создания алгоритмов и программ операционной системы вызвала на первых этапах внедрения ЦВМ7

серьезные возражения со стороны разработчиков алгоритмов управления и особенно программистов, так как требовала глубокого понимания особенностей работы аппаратуры.

В итоге это противостояние закончилось, так как появилась необходимость решить принципиально новую и крайне сложную проблему. Генеральным заказчиком было предъявлено требование обеспечения работы САУ при активном противодействии в виде мощных проникающих импульсных электромагнитных и ионизирующих излучений.

В результате совместной работы разработчиков алгоритмов управления и БЦВС эта задача с опорой на новые возможности аппаратуры была успешно решена [5]. С этого момента началась эпоха совместной разработки общесистемной аппаратуры и системного программного обеспечения. Сложность отработки такой вычислительной системы и ее математического обеспечения потребовала создания стендов для отработки в виде моделирующих комплексов для отработки алгоритмов, а также автоматизированных рабочих мест (АРМ) отработки программ. Таким образом, прогресс в развитии БЦВС создал базу для прогресса в создании систем управления.

Необходимо упомянуть о создании БЦВС на основе БЦВМ «Малахит 2». Особенностью этой БЦВМ был переход от 16-разрядной шкалы к 32-разрядной.

Кроме того, для упрощения работ по созданию математического обеспечения вычислительных систем был сделан некоторый шаг назад. Произошел отказ от направления создания адаптивных систем с перестраиваемым быстродействием. Вместо коммутаторов и возможности организации параллельного счета между процессором и блоками памяти были установлены узлы мажоритации, введение которых привело к снижению быстродействия из-за необходимости учета межканальных фазовых сдвигов. Для компенсации потерь быстродействия вместо ИМС серии 734 с малым энергопотреблением были применены более быстродействующие, но имеющие существенно большее энергопотребление ИМС се-

рий 533 и 1533. Переход на 32-разрядную шкалу, а также введение мажоритаров вместо коммутаторов упростили работу по созданию математического обеспечения БЦВС, но привели к существенному росту аппаратурных затрат и энергопотребления, что не позволило применить БЦВМ «Малахит 2» так же широко, как была применена ЦВМ7. Однако необходимо отметить, что мажоритированные структуры, несмотря на их недостатки, связанные с пониженным быстродействием и большими аппаратурными затратами, имели очевидное достоинство с точки зрения разработчиков программного обеспечения, так как нейтрализация возникающих в одном из каналов кратковременных отказов (сбоев) осуществлялась автоматически аппаратурными средствами и не требовала участия программ. В процессе эксплуатации проявился очевидный недостаток таких систем, который заключался в невозможности нейтрализовать отказы в самих узлах мажоритации. Все отмеченные недостатки, несмотря на ряд достоинств БЦВМ «Малахит 2», привели к тому, что эта БЦВС нашла применение в системе управления только одного изделия ЗМ—37 и развития не получила.

ДЛЯ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ (1975—1985 гг.) характерно резкое возрастание требований к производительности вычислительных средств, а также ужесточение активного противодействия в виде мощного импульсного излучения при одновременном ужесточении традиционных требований сокращения массы и габаритов аппаратуры. Решение новых проблем потребовало применения принципиально новых структурных решений, а также широкого применения больших и сверхбольших интегральных микросхем.

В лаборатории В. М. Антимирова были созданы первые в отрасли образцы вычислителей на основе БИС серии 1802 (ТТЛш-БИС) и БИС серии 588 (КМОП-БИС). Вычислители на основе ТТЛш-БИС не нашли применение из-за большого энергопотребления. Развитие получили устройства на основе КМОП БИС. В частности, можно отметить создание

многопроцессорного вычислительного устройства на основе БИС серии 588, предназначенного в бортовой системе управления темы «Овал» для обработки информации многолучевого высотомера [6]. Кроме того, на основе БИС серии 588 был разработан первый вариант 16-разрядного вычислителя внутрисистемного применения, который получил свое развитие при применении бескорпусных БИС серии Б1825 (технологии КМОП/КНС), особенностью которых являлось бескорпусное исполнение БИС, позволившее использовать уникальные возможности НПОА по созданию устройств на основе микросборок. На основе этого комплекта КМОП/КНС БИС, дополненного КМОП/КНС БИС запоминающих устройств серии Б1620, было создано несколько вычислительных модулей:

- 32-разрядный вычислитель универсального назначения;
- 16-разрядный вычислитель для решения задач внешнего обмена, а также задач контроля и диспетчирования потоков информации внутри БЦВС.

Эти модули легли в основу принципиально нового поколения БЦВС в части архитектуры. Началось создание магистрально-модульных систем, получивших название модули ЦВС Малахит 3 (М3). При создании модулей М3 были учтены достоинства и недостатки предыдущих поколений. Основная вычислительная нагрузка была возложена на 32-разрядные вычислительные модули (ВМ), не имевшие никаких системных средств между процессором и запоминающими устройствами, что обеспечило максимальное быстродействие. С этих модулей, решающих основные функциональные задачи системы управления, были сняты все общесистемные задачи по контролю исправности и нейтрализации возникающих отказов [7]. Для этих задач был разработан 16-разрядный системный модуль (СМ).

Для обеспечения обмена с внешними подсистемами был разработан модуль связи (МС), включающий в свой состав 16-разрядный процессор и запоминающие устрой-

ства. МС самостоятельно по своей программе производил все обмены с внешними подсистемами, включая контроль правильности передачи данных и повторение обменов при обнаружении ошибок. Все обмены МС вел без участия ВМ и СМ.

Для организации межмодульного обмена все модули были объединены через троированную 16-разрядную внутрисистемную магистраль, управление которой осуществлял СМ. С целью повышения надежности СМ был реализован в трехканальном исполнении с мажоритацией связей между процессором и памятью, а также входов и выходов внутрисистемной магистрали. Применение мажоритации в данном случае, в отличие от Малахита 2, было оправдано, так как применялось для 16-разрядных связей и не влияло на производительность вычислительной системы, учитывая, что все функциональные задачи, требовавшие высокой производительности, решались ВМ.

Более того, в ВМ был внедрен ряд решений, обеспечивающих повышение производительности не путем увеличения быстродействия, а за счет совершенствования архитектуры процессора. В частности, на основе анализа задач управления по алгоритмам, разработанным Н. А. Лукиным и П. С. Шабашовым, в систему команд ВМ были введены команды вычисления тригонометрических функций, широко применяемых при преобразовании систем координат, а также алгебраических функций типа корня квадратного и обратной величины.

Кроме того, магистрально-модульная организация системы позволила радикально решить задачу повышения производительности путем организации параллельных вычислений, для чего в состав системы устанавливалось необходимое количество ВМ. При этом была решена задача обеспечения высокоскоростного обмена между модулями по общесистемной магистрали [6].

Все это обеспечило самое широкое применение этой БЦВС, которая стала основой САУ комплексов 3М-37 (3М-37У), 3К-30, развития комплексов типа «Овал», 14А14, а также корабельной и наземной части системы управления этих комплексов.

Организация параллельных вычислений требовала интенсивного межмодульного обмена. Для решения этой проблемы в состав модулей ВМ и МС были введены каналы прямого доступа к памяти модулей, подключаемые через узлы мажоритации непосредственно к внутрисистемной магистрали и получившие название устройств связи по магистрали (УСМ). УСМ имели собственное микропрограммное устройство управления, работающее по командам, получаемым от СМ. Все это позволило организовывать и вести межмодульный обмен без участия процессоров функциональных модулей.

В магистрально-модульной структуре задача повышения надежности решается установкой необходимого числа модулей. Задача контроля их исправности обеспечивается системным модулем. Например, контроль ВМ проводится путем сравнения по программе СМ результирующей информации нескольких модулей, решающих одну и ту же задачу в режиме резервного счета. По сути, программными средствами реализован принцип мажоритации.

Одиночные отказы в СМ и общесистемной магистрали нейтрализуются аппаратурными средствами (мажоритарами) и не требуют участия программистов. Таким образом, при создании этого поколения БЦВС решен вопрос как повышения надежности, так и обеспечения требуемой для каждой новой системы управления производительности. Причем создание БЦВС для каждой новой САУ сводится к установке необходимого количества модулей ВМ и МС, а также разработке математического обеспечения СМ.

Структура БСВС с магистрально-модульной архитектурой приведена на рис. 1.5.

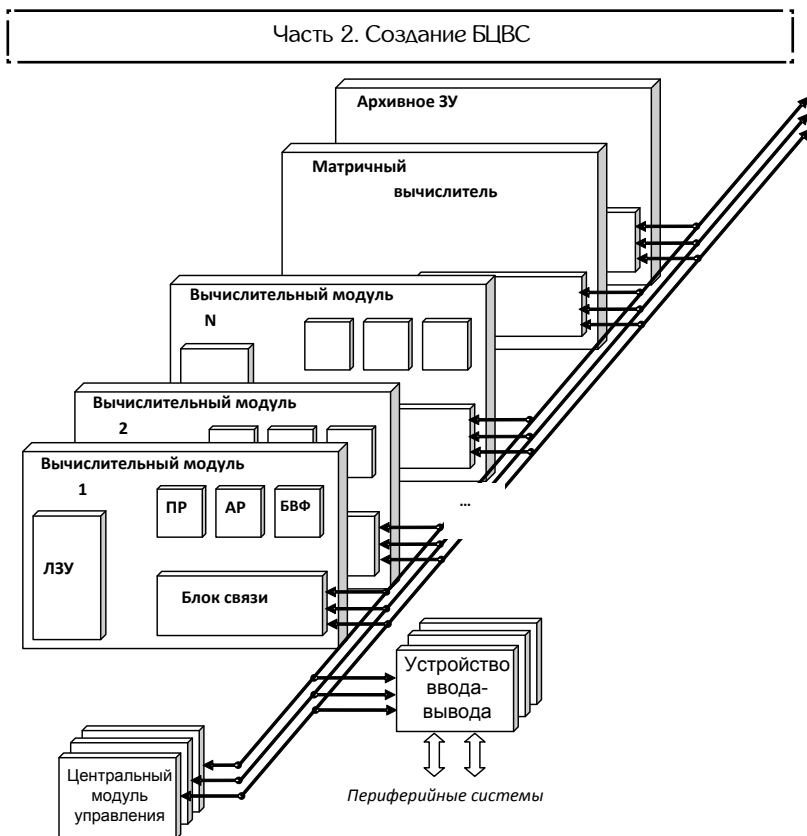


Рис. 1.5. Структура БЦВС с магистранно-модульной архитектурой

ПЯТОЕ ПОКОЛЕНИЕ (1990–2005 г)

Создание магистранно-модульных систем пятого поколения, получивших название модули БЦВС Малахит 7 (М7), явилось развитием основных принципов, заложенных в основу комплекта модулей М3 [8].

Свое название М7 БЦВС получила в память лучшей БЦВМ своего времени (ЦВМ7).

Основной особенностью нового поколения является переход от микропроцессорных БИС с микропрограммным управ-

лением (серий типа 588 и 1825) к сверхбольшим интегральным микросхемам (СБИС) микропроцессоров со встроенной системой команд. Широкое применение нашли СБИС серии 1867, созданные в НИИЭТ (г. Воронеж). СБИС 1867ВМ2 использовались как для построения 16-разрядного вычислителя модуля системного процессора, так и для реализации интеллектуальных модулей каналов обмена.

Реализация 32-разрядных вычислительных модулей была осуществлена основе СБИС 1867ВЦ6Ф (1867ВМ3).

Разработка магистрально-модульных систем М7 велась под руководством начальника отдела В. М. Антимирова, основными разработчиками были А. С. Наронов, Я. В. Антимиров, В. Н. Оськина, В. Н. Бизяева, С. Г. Шестаков, Р. Е. Лысак и ряд вновь пришедших молодых специалистов, которым еще предстоит сказать свое слово в создании управляющих вычислительных систем.

ШЕСТОЕ ПОКОЛЕНИЕ — перспективное.

Опыт применения СБИС микропроцессоров со встроенной системой команд позволил сформулировать направление дальнейших работ по созданию вычислительных систем. Это направление можно кратко сформулировать следующим образом: «создание распределенных систем», когда вычислительные средства вместо создания централизованной БЦВС как основного ядра системы управления распределяются по подсистемам, в частности вычислительными средствами оснащаются подсистемы:

- инерциальной навигации;
- оптической коррекции;
- спутниковой коррекции.

Особо можно выделить подсистему преобразовательно-коммутационной аппаратуры (ПКА), которая, получив функциональную завершенность, может устанавливаться как аппаратура автономного управления отдельными агрегатами или компонентами изделия, например для системы аварийной защиты двигателей.

При этом как перспективу развития можно выделить направление разработок на основе прошлого опыта, которое можно сформулировать как первый этап работ на пути к созданию функционально завершенных вычислительных устройств типа «система на кристалле» (СНК), а именно создание на первом этапе функционально законченных систем в микросборке (система в корпусе), а затем и в кристалле [8]. Эти вычислители могут стать основным строительным компонентом распределенных систем управления.

ВЫВОДЫ

Бортовые вычислительные средства прошли большой путь от создания БЦВС на основе нескольких (менее 10) типов дискретных ЭРИ через повышение степени интеграции к использованию ограниченной номенклатуры (менее 10 типов) больших и сверхбольших интегральных микросхем. Разработки вплотную подошли к созданию СНК, которые могут стать элементной базой вновь создаваемых систем управления объектами ракетно-космической техники.

С точки зрения развития структуры вычислительные средства проделали большой путь, начиная от узкоспециализированных приборов типа СРПАД, пройдя этап создания мощных централизованных вычислительных систем, решающих все задачи системы управления. В настоящее время разработчики БЦВС вернулись к созданию миниатюрных специализированных вычислителей типа СНК, встраиваемых в подсистемы, что вывело создание БЦВС на новый виток развития, который в виде СНК может повторить весь рассмотренный путь развития БЦВС.

Список литературы к разделу

1. А. с. 7181 G 06 F. Устройство контроля / В. М. Антимиров. От 04.02.1972.
2. А. с. 490115 G 06 F 3/04. Система для обмена данными / В. М. Антимиров, Т. В. Орлова. От 07.11.1977.

3. А. с. № 75145 G 06 F. Управляющая ЦВМ / В. М. Антимиров, В. Д. Трифонов, Г. Н. Зубарева, В. К. Передерий. От 05.06.1972.
4. Антимиров В. М. Повышение устойчивости БЦВС к внешним воздействиям // Сб. РКТ, 1976. Сер. 11; вып. 4.
5. Антимиров В. М. Вопросы построения адаптивных специализированных вычислителей для задач навигации по картам местности // Материалы XIV межотраслевой конференции памяти Н. Н. Острякова. Л. : ЦНИИ «Румб», 1985.
6. Антимиров В. М. Оптимизация затрат, направленных на повышение надежности адаптивных вычислительных систем // Сб. РКТ, 1974. Сер. 11; вып. 1.
7. Тенденции развития элементной базы и архитектуры перспективных ЦВС // Сб. РКТ, 1987. Сер. 11; вып. 4.
8. Антимиров В. М., Антимиров Я. В., Лысак Р. Е. Особенности реализации бортовых вычислительных машин по технологии «система в корпусе» // Материалы Межотраслевой конференции по радиационной стойкости «Стойкость 2010». Снежинск, 2010.

Вопросы к разделу

1. Каковы основные тенденции создания перспективных систем нового поколения?
2. Каковы достоинства и недостатки систем с узлами мажоритации?
3. Как связано создание БЦВС с созданием элементной базы?
4. В чем достоинства и недостатки создания собственных элементов для построения БЦВМ?
5. В чем заключаются преимущества создания БЦВМ на интегральных микросхемах различной степени интеграции?
6. Каковы достоинства и недостатки БЦВС с мажоритацией выходных шин последовательной передачи информации?
7. Какое устройство в первых САУ обеспечивало программное формирование траектории и выдачу команд на исполнительные органы?

8. Чем обусловлена необходимость введения БЦВМ в состав САУ?

9. Какова роль появления интегральных микросхем в создании БЦВС второго поколения?

10. Какие принципиально новые конструкторские решения были применены в ЦВМ7?

11. Почему БЦВМ М2 не получила широкого применения?

12. Каковы задачи системного модуля в магистрально-модульных системах?

13. Где могут использоваться вычислительные устройства, созданные по технологии «система в корпусе» или «система на кристалле»?

2. Интерфейсы

Под интерфейсом будем понимать основные принципы взаимодействия в части передачи данных между подсистемами, которые включают правила взаимодействия, среду передачи данных, разрядность, количество передаваемых одновременно бит, наличие и состав служебных шин и сигналов, временные (фазовые) соотношения между ними и правила выдачи и приема данных.

По способу передачи данных в части количества одновременно передаваемых бит можно выделить последовательную и параллельную передачу данных, а по принципу фазовых соотношений сигналов можно выделить синхронные и асинхронные принципы передачи.

Синхронное взаимодействие предполагает сопровождение данных синхросигналами активного устройства (например, процессора) и вполне конкретное быстродействие подчиненных устройств (например, запоминающих устройств), которое ограничено жесткими требованиями по готовности запрашиваемой информации или возможности перехода к очередному взаимодействию. При асинхронном обмене сигнал синхронизации передается совместно с информацией и определен, как правило, набор фиксированных частот передачи. К быстродействию подчиненных устройств не предъявляется таких жестких требований, как в синхронном обмене, и они могут отвечать по мере готовности, направляя соответственно посылку данных или служебный сигнал ответа.

По составу взаимодействующих устройств интерфейс можно подразделить на *радиальный* (попарный) *принцип связи*, когда к шинам подключены только два устройства (например, актив-

ное — процессор и подчиненное — запоминающее устройство) и *магистральные связи*, когда к общим шинам подключены несколько устройств с различными адресами.

По дальности связи можно выделить внутрисистемные интерфейсы, к которым относятся внутримодульный (внутриприборный) и межмодульный. Типичный пример внутрисистемного интерфейса — связь между вычислительными модулями внутри БЦВС; к межприборным интерфейсам относится, например, связь БЦВС с ПКА. Замыкают это деление межсистемные интерфейсы, например, связи БЦВС с аппаратурой наземной (корабельной) части системы управления, а также связь БЦВС с автоматикой блоков или другой полезной нагрузкой изделия.

2.1. Внутримодульный синхронный параллельный интерфейс

Внутримодульный параллельный интерфейс, примером которого является связь процессора с внутренней памятью, используется в первую очередь в том случае, когда требуется высокая пропускная способность, а затраты оборудования приемлемы в силу малых расстояний между устройствами и не требуют большой энергетики передатчика. Его основное достоинство — высокая скорость передачи, а основной недостаток — увеличенные затраты оборудования и энергетики. Особенностью синхронной передачи является жесткое требование к быстродействию устройств, от которых требуется прием или выдача данных в строго определенное время. При невыполнении этого условия обмен «разваливается», что не позволяет использовать устройства с другим быстродействием, например ЗУ с магнитным накопителем, хотя в ряде случаев это необходимо, например при решении задачи обеспечения стойкости к внешним импульсным излучениям.

В синхронном параллельном интерфейсе БЦВМ с целью повышения скорости обмена применяют так называемую гарвардскую архитектуру [1], которая предполагает наличие раз-

дельных шин данных и адреса. При этом и адрес, и данные сопровождаются своим синхроимпульсом. Такое построение приемлемо для БЦВМ, где связи находятся в пределах одного конструктивного элемента.

Однако создатели микропроцессоров перешли к совмещению адреса и данных в одной шине (А\Д), оставив отдельной шину синхроимпульсов (СИ) — Неймановская архитектура (см. рис. 2.1). Это совмещение было сделано из-за жестких ограничений на количество выводов БИС, которое диктуется как размерами кристалла, так и необходимостью его установки в стандартные корпуса с фиксированным количеством выводов.

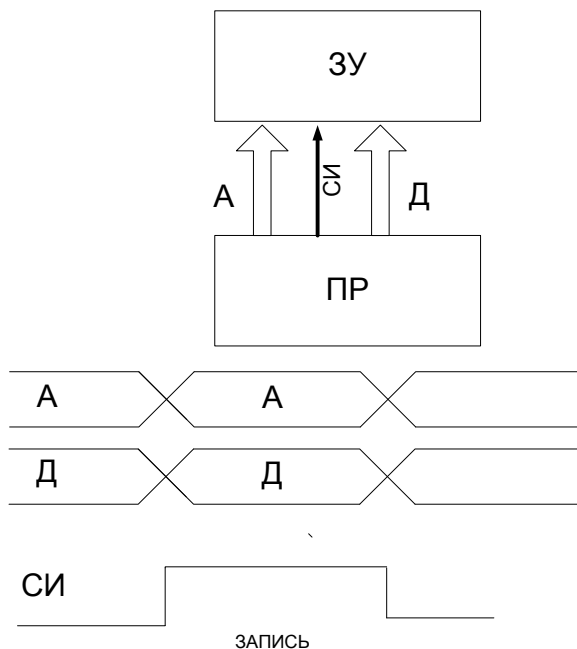


Рис. 2.1. Синхронный параллельный интерфейс:
ПР — процессор, ЗУ — запоминающее устройство

При этом для разделения моментов фиксации адреса и данных стали использовать разные фронты синхроимпульса. При записи, например, передний фронт используется для записи адреса в буферный регистр ЗУ, а данные, сменившие на шине адрес, заносятся по заднему фронту. При чтении также по переднему фронту фиксируется адрес в буферном регистре, а данные выставляются на шину по заднему фронту. К этому моменту процессор освобождает шину. Такое построение ограничивает производительность БЦВМ при использовании готовых микропроцессоров и приводит к необходимости введения функциональных расширителей типа вычислителей тригонометрических и алгебраических функций, но позволяет использовать для создания программ в полной мере технологическое математическое обеспечение, которым, как правило, сопровождаются современные микропроцессоры.

Однако при этом сохраняется основное ограничение синхронного взаимодействия, которое требует определенного быстродействия подчиненного блока, которым и является ЗУ, что препятствует его независимой модернизации.

Синхронный параллельный интерфейс с отдельными шинами адреса и данных, так называемая гарвардская архитектура, обладает несомненными достоинствами с точки зрения обеспечения быстродействия обмена, а следовательно, и производительности БЦВМ, но требует заметных затрат оборудования и энергии, а также фиксированной длины связей и их электрофизических параметров, влияющих на время прохождения сигнала, что приемлемо для БЦВМ, конструктивно выполненной в виде одной неизменяемой сборки.

Однако требование обеспечения от ЗУ строго определенного и ограниченного сверху времени работы исключает его независимую модификацию и изменение конструкторской реализации, например применение энергонезависимых накопителей, которые необходимы для обеспечения устойчивости БЦВС к внешним импульсным электромагнитным воздействиям. Кроме того, не допускается никакая переконфигурация блоков.

Все это требует новых решений по организации обмена процессора с подчиненными модулями (ЗУ и устройствами обмена).

Анализ возможных путей создания интерфейса, учитывающего фактическое быстродействие модулей (ЗУ и устройств обмена) и время распространения сигналов по линиям связи, показал целесообразность применения интерфейса типа межмодульного параллельного интерфейса (МПИ), который был разработан при создании семейства управляющих ЭВМ ряда СМ ЭВМ [2].

Особенностью таких ЭВМ было модульное построение, когда в виде самостоятельных модулей, помимо процессоров разных модификаций, выполнялись запоминающие устройства различной реализации, в состав которых дополнительно к быстродействующему полупроводниковому ЗУ были введены магнитные накопители дискового (барабанного) типа и накопители на магнитных лентах, имеющие принципиально разное быстродействие. Кроме того, был создан набор модулей устройств обмена с периферийными подсистемами, также имеющими разное быстродействие. Все модули собирались в этажерочную конструкцию, выполненную в виде шкафа и не имеющую фиксированных конструктивных связей между модулями, расстояние между которыми зависит от места установки.

Для организации обмена между модулями был выбран магистральный интерфейс, содержащий 16-разрядную параллельную шину, совмещенную для передачи адреса и данных — МПИ (см. рис. 2.2, 2.3). Информация в шине при передаче от активного модуля (например, процессора) сопровождается сигналом синхронизации задатчика (СХЗ), а подчиненное устройство (например, ЗУ или устройство обмена) приняв текущую информацию, (например, адрес) и подготовившись к принятию следующей посылки (данных) или подготовив запрашиваемые процессором данные и выставив их на шину, выставляет ответный сигнал синхронизации ис-

полнителя (СХИ). Процессор (ПР) переходит к следующему такту обмена только после получения сигнала СХИ. Это позволяет учесть фактическое быстродействие модулей и место их компоновки.

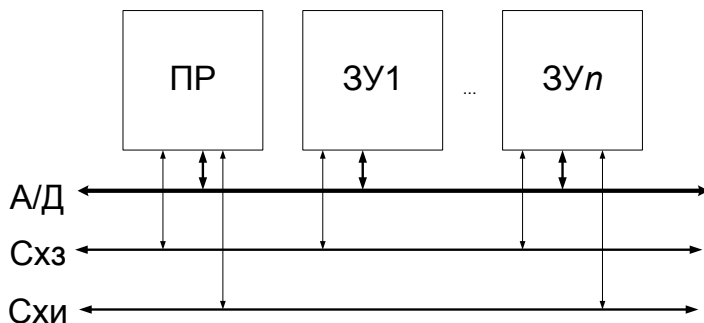


Рис. 2.2. Шины МПИ

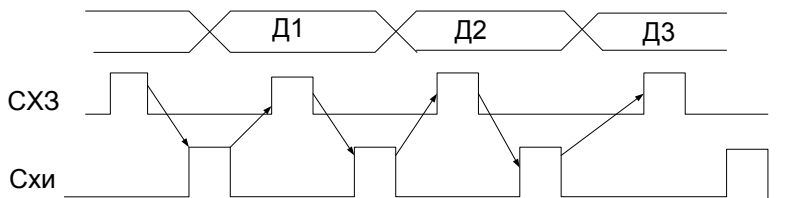


Рис. 2.3. Диаграмма МПИ

Интерфейс МПИ включает совмещенную шину адрес-данных (А/Д) и две шины синхронизации СХЗ и СХИ.

Интерфейс МПИ решает проблему подключения к шине подчиненных устройств с различным быстродействием и позволяет учесть разброс времени передачи при установке устройств в разных частях сборки. Но он обладает существенным недостатком: требует значительных затрат оборудования и энергетики для обеспечения передачи адреса и данных параллельным 16-разрядным кодом, что неприемлемо для свя-

зи с устройствами и подсистемами, находящимися за пределами сборки, а в нашем случае вне БЦВС, и тем более вне приборного отсека. Такой подсистемой является автоматика блоков, находящаяся на удаленном расстоянии и, более того, конструктивно на частях изделия, имеющих другой статический потенциал. Гальваническая связь с такой аппаратурой недопустима как для обеспечения помехоустойчивости связи и работы подсистем, так и для обеспечения безопасности с точки зрения несанкционированного срабатывания автоматики блока.

В связи с этим для организации обмена БЦВС с внешними подсистемами целесообразна последовательная передача данных при ограниченном объеме передаваемой информации. Достаточно широко распространен в системах общего применения, например в АСУ, последовательный асинхронный интерфейс.

2.2. Последовательный асинхронный интерфейс

Примером последовательного асинхронного интерфейса является интерфейс типа RS-232 [3], который предназначен для передачи данных последовательным кодом на расстояния в пределах нескольких метров (5–10 м) на нескольких фиксированных частотах (от 64 до 128 КГц) и предполагает работу передатчиков и приемников информации (а точнее, их кодирующих и декодирующих устройств) на выбранных частотах, задаваемых при настройке интерфейса. При этом требуется достаточно высокая стабильность частот их задающих генераторов.

Синхронизация устройств обеспечивается наличием у каждого байта передаваемых данных «стартового» и «стопового» битов (высокого или низкого уровня сигнала в линии в соответствии с выбранной кодировкой «0» и «1»). Временная диаграмма этого интерфейса приведена на рис. 2.4.

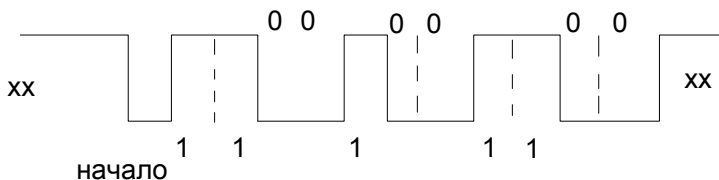


Рис. 2.4. Кодировка RS-232

Передача данных идет байтами по 8 разрядов. Каждый байт начинается и заканчивается «стоповыми» сигналами (холостым ходом — XX) длительностью не менее 2 периодов выбранной частоты обмена. Уровень «стоповых» битов (высокий или низкий) определяется выбранным режимом. Каждый байт может сопровождаться контрольным 9-м битом, дополняющим сумму значащих разрядов до четного или нечетного значения в соответствии с выбранным режимом (возможна передача без контрольного бита).

Данный интерфейс обеспечивает связь с внешними устройствами, но имеет существенный недостаток, заключающийся в отсутствии гальванической развязки. Эта задача решается в модификации RS-232 в варианте так называемой токовой петли, когда передача каждого бита идет не уровнем напряжения, а током. Например, наличие тока может кодировать «1», а отсутствие «0» или наоборот.

При передаче сигнала током на приемной стороне может быть установлена оптоэлектронная пара — оптрон, в котором на входе установлен светодиод, дающий световой поток при протекании через него тока, вторым компонентом оптрона является светочувствительный фототранзистор, открывающийся при попадании на него света. Оптод устанавливается в герметичный светонепроницаемый корпус. Поскольку транзистор находится под питанием принимающего устройства, передача активного сигнала идет световым потоком, что обеспечивает хорошую гальваническую развязку.

Сигнал на дальнейшую обработку снимается с резистора, установленного в коллекторную или эмиттерную цепь фото-

транзистора. Линия связи с гальванической развязкой приведена на рис. 2.5.

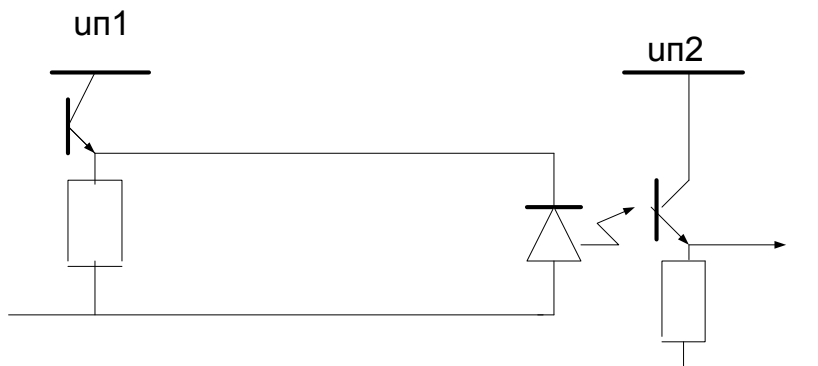


Рис. 2.5. Передача с опторазвязкой, где up1 и up2 — шины питания передатчика и приемника

Установка оптрона на приемной стороне частично решает проблему гальванической развязки, но выдвигает ряд требований к реализации оптопары. Как видно из рисунка, для протекания тока нужны два провода — прямой и обратный, т. е. потенциал передатчика все же приходит в корпус оптрона и требуется обеспечить высокую прочность изоляции между светодиодом и фототранзистором, что само по себе является достаточно сложной технической задачей конструкторского характера. Задача эта решена, и промышленностью выпускаются необходимые для реализации интерфейса оптопары.

Применительно к САУ, разрабатываемым в НПОА для объектов ракетно-космической техники, особенно для изделий морского базирования, реализация гальванической развязки с помощью оптронов наталкивается на серьезную проблему, связанную с обеспечением стойкости к ионизирующему излучению. Фототранзистор выполнен таким образом, что поток электромагнитного излучения вызывает появление в нем носителей заряда и вызывает его открытие. По своей природе

действие ионизирующего излучения (например, потока гамма-квантов) имеет ту же природу электромагнитного излучения и вызывает срабатывание фототранзистора, а следовательно, нарушает работоспособность линии связи.

Создание оптопар, стойких к проникающему ионизирующему излучению, является сложной научно-технической проблемой, требующей существенных экономических затрат. Из-за отсутствия радиационно стойких оптопар применение такой развязки в бортовых САУ изделий ракетно-космической техники практически исключено. Требуется принципиально другое решение задачи обеспечения гальванической развязки. Возможным решением этой проблемы является применение трансформаторов, аналогом такой линии связи общепромышленного применения может быть интерфейс RS-485/232 с трансформаторным входом-выходом. Вопросы, связанные с обеспечением стойкости к ионизирующему излучению, для приемо-передатчиков с трансформаторным входом и выходом решаются самой природой замкнутого в сердечнике трансформатора (магнитопроводе) магнитного поля, с которым гамма-кванты не взаимодействуют. Схема связи на основе трансформаторных гальванических развязок приведена на рис. 2.6.

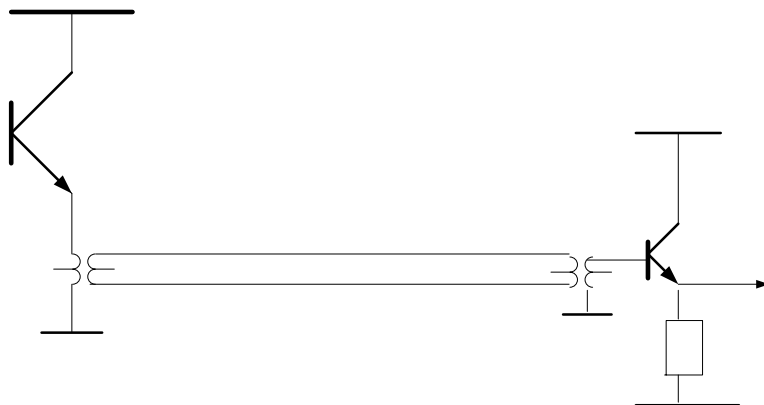


Рис. 2.6. Линия связи с трансформаторной развязкой

Трансформаторная связь решает задачу обеспечения высоковольтной гальванической развязки, так как есть технические решения, к которым относится заливка обмоток компаундом. В то же время введение трансформаторов приводит к необходимости решать задачу исключения насыщения магнитопровода при передаче сигналов одной полярности. Появление подмагничивания приводит к снижению амплитуды передаваемых сигналов вплоть до критического уровня, при достижении которого уровень сигнала падает настолько, что перестает восприниматься следующими элементами.

Для решения этой задачи был предложен достаточно оригинальный вариант передачи, так называемым парафазным кодом, этот вариант был использован, в частности, для обмена с автоматикой блоков, разрабатываемой РФЯЦ-ВНИИТФ. Суть передачи этим кодом заключается в том, что передача логических «1» и «0» идет по разным шинам, что при реальном распределении «1» и «0» по разрядам передаваемого слова заметно снижает величину постоянной составляющей тока в линии, вызывающей подмагничивание. Однако при такой передаче возникает задача выделения разрядов слова, так как линия синхроимпульсов отсутствует, а передача ведется на частоте источника данных, причем оговорена только верхняя граница частоты выдачи.

Для выделения каждого такта передачи используется логическое сложение сигналов обеих шин по ИЛИ, что позволяет организовать счет тактов и определить как начало, так и окончание слова. Временная диаграмма передачи парафазным кодом приведена на рис. 2.7.

Для стробировки принимаемой информации при записи ее в сдвиговый регистр приемника используется простая схема, предложенная Т. В. Орловой [4], суть схемы заключается в том, что объединенные по ИЛИ сигналы дают синхроимпульс. Для точной фазировки СИ с битом данных применяют схему, в которой объединенный сигнал пропускают через элемент за-

держки, а затем прямой и задержанный сигналы объединяют на элементе И, в результате чего синхроимпульс устанавливается строго под значащим разрядом и обеспечивает достоверную запись в приемный регистр.

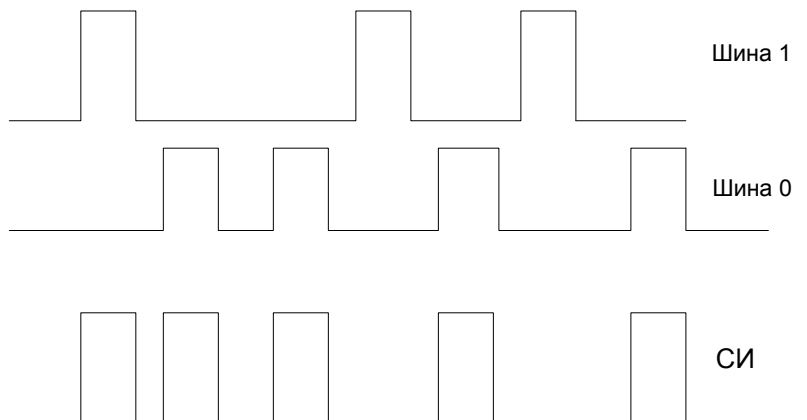


Рис. 2.7. Временная диаграмма передачи парафазным кодом

Такая организация передачи только частично решает проблему подмагничивания, так как по линиям следуют импульсы одной полярности, что в одной линии дает постоянную составляющую, сдвигающую петлю гистерезиса магнитопровода и приводящую в итоге к снижению амплитуды сигнала.

Для исключения подмагничивания необходим двухполярный импульс, причем с полностью симметричными положительной и отрицательной полуволнами. При таком импульсе подмагничивание, вызванное одной полуволной, компенсируется противоположной.

Такой принцип передачи сигнала через трансформатор заложен в последовательном магистральном интерфейсе системы электронных модулей [5], который получил жаргонное имя

«манчестерский интерфейс», по месту его первого применения. Интерфейс стандартизован за рубежом для систем военного назначения и космических систем как стандарт MIL STD 1533.

По принципам, заложенным в этом стандарте, по инициативе специалистов авиационной промышленности была сделана отечественная разработка комплекта БИС, обеспечивающих реализацию магистрального последовательного интерфейса с трансформаторным выходом на линию. Интерфейс был стандартизован в РФ как ГОСТ Р 52070–2003 под именем «Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей», который был введен с 1 января 2004 года.

По требованиям данного стандарта передача ведется массивами 16-разрядных слов данных, причем передача одного слова состоит из 20 тактов, первые три из которых занимает синхросигнал, который аналогично «стоповому» биту в интерфейсе RS-232 фиксирует конец одного и начало следующего слова и обеспечивает привязку поступающих сигналов к собственной частоте приемника. Необходимо отметить, что в отличие от RS-232 здесь нет набора частот, а выбрана фиксированная частота 1 МГц.

В передаче участвуют слова двух типов:

- служебные, к которым относится командное слово (КС), выдаваемое задающим обмен устройством, например центральным вычислителем (БЦВС), и ответное слово (ОС), выдаваемое периферийной подсистемой, например автоматикой блоков;

- слова данных, передаваемые как БЦВС, так и периферийной подсистемой.

Служебные слова и слова данных отличаются кодировкой синхросигналов, с которых начинается каждое слово. В командном слове такты с 4 по 8 отводятся под «адрес оконечного устройства» (адрес ОУ) — адрес подсистемы, принимающей данные. Введение адреса вызвано самим принципом магистрали, когда к шинам подключены несколько подсистем, каждая

из которых имеет свой адрес; 9-й разряд отведен под признак прием/выдача. Разряды с 10 по 14, названные адресом абонента, отведены под внутренний подадрес модуля в ОУ (в этих разрядах может также кодироваться режим управления). В разрядах с 15 по 19 задается число слов в массиве или код команды, если в предыдущих разрядах задано, что идет команда. Последний 20 разряд отведен под контрольный бит дополнения до четности (нечетности).

Ответное слово имеет следующую структуру. Разряды с 1 по 3 содержат синхросигнал служебного слова. Разряды с 4 по 8 отведены под передачу собственного адреса отвечающего ОУ. В 9-м разряде передается признак наличия ошибки в принятом сообщении, которая может возникнуть при браковании какого-либо слова контролем по четности (нечетности) или при передаче массива по несовпадению контрольных сумм. В 10-м разряде передается признак ответного слова; 11-й разряд отведен под формирование требования ОУ на обслуживание. Разряды с 12 по 14 стандартом зарезервированы и могут использоваться по договоренности в замкнутой кооперации подсистем, например в рамках конкретной САУ какого-либо изделия. 15-й разряд отведен под признак ответа приема групповой команды, когда идет посылка сразу несколькими ОУ (такая посылка может быть использована в режиме проверки подключения ОУ к магистрали). В 16 разряде кодируется признак занятости конкретного абонента, входящего в состав ОУ, если был указан соответствующий подадрес в командном слове; в 17 разряде передается признак наличия неисправности абонента; 18-й разряд содержит признак принятия управления магистралью данным ОУ; 19-й разряд отведен под признак наличия какой-либо неисправности в ОУ, обнаруженной собственными средствами контроля. 20-й разряд, как и во всех словах, отведен под контрольный бит четности (нечетности).

Можно заметить, что исторически данный интерфейс первоначально предназначался для электронных систем самолета при передаче на расстояние около 100 м, где центральная

управляющая БЦВМ выдает закодированные команды на исполнительные подсистемы объекта, в силу удаленности и по принципу подключения являющиеся оконечными устройствами. В дальнейшем интерфейс был применен для связи между интеллектуальными системами, какими в наших комплексах являются бортовая система управления и корабельная или наземная.

Однако в данном применении интерфейс является избыточным и достаточно неудобным при взаимодействии. Все дело заключается в том, что в силу первоначального применения под число слов в массиве отведено всего 5 разрядов командного слова с 15 по 19. Это ограничивает длину сообщения 32 словами. Кроме того, возникают серьезные технические сложности в части обеспечения амплитуды сигнала из-за больших длин связи. Для передачи требуется однородная линия связи с определенным волновым сопротивлением (75 Ом), что при реальной кабельной сети с отрывными разъемами вызывает серьезные проблемы конструкторской реализации.

При взаимодействии с простыми подсистемами 32 слов в массиве достаточно, но при использовании этого стандарта для связи БЦВС с корабельной (наземной) аппаратурой это вызывает серьезные проблемы, так как реальные массивы значительно превышают возможное количество слов, поэтому весь требуемый массив передается по частям, что усложняет логику взаимодействия и программы, хотя имеет свой положительный момент: при обнаружении ошибки в передаче повторяться может не весь массив, а только его небольшая часть (32 слова), при передаче которого возникла ошибка.

Для исключения подмагничивания трансформаторов в данном интерфейсе используются двухполярные импульсы как для передачи «0», так и «1», которые различаются фазой перехода начала импульса через нулевое значение. Принято кодировать «1» импульсом, в котором первая полуволна имеет положительную полярность, а вторая симметричная по площади — отрицательную, и наоборот для «0», хотя это на-

значение условно и в частном применении может быть пересмотрено. Форма импульсов, передающих «1» и «0», приведена на рис. 2.8.

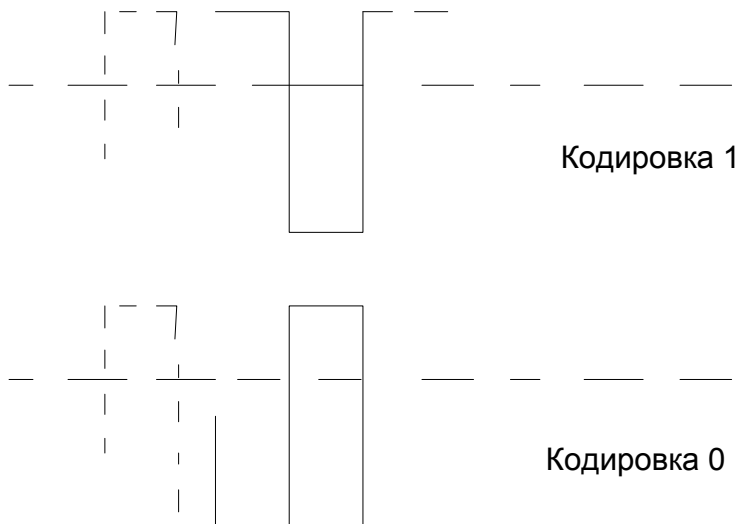


Рис. 2.8. Форма импульсов, передающих «1» и «0»

Синхросигнал кодируется таким образом, что начинается с отрицательного значения в первом и втором разрядах со смежной полярности во втором разряде и завершается положительным значением в третьем разряде.

На начало 2010 г. интерфейс по ГОСТ Р 52070–2003 получил широкое применение как для связи БЦВС с периферийными подсистемами смежных предприятий, к которым относятся подсистема инерциальной навигации (как традиционная ГСП, так и перспективная БИНС), оптико-электронная аппаратура подсистемы оптической коррекции, аппаратура спутниковой навигации и автоматика блоков, так и для связи с собственными подсистемами, как с бортовыми (подсистема преобразовательно-коммутационной аппаратуры), так и с наземными (корабельными) частями системы управления.

Список литературы к разделу

1. Л. Н. Королев. Структуры ЭВМ и их математическое обеспечение. М. : Наука, 1978.
2. Управляющие вычислительные комплексы : учеб. пособие / Н. А. Прохоров [и др.] М. : Финансы и статистика, 2003.
3. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM / пер. с англ. М. : МИР, 1992.
4. А. с. № 490115 G 06 F 3/04. Система для обмена данными управляющей вычислительной машины с периферийными устройствами./ Т. В. Орлова. От 17.11.1972.
5. ГОСТ Р 52070—2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. М., 2003.

Вопросы к разделу

1. Какие основные виды связи по количеству передаваемых бит одновременно в одной посылке применяются для внутри-модульных связей?
2. Какое основное требование к подчиненному устройству предъявляется в синхронном интерфейсе?
3. Каковы основные достоинства и недостатки синхронного параллельного интерфейса?
4. В каких связях используют последовательную передачу данных?
5. Чем обусловлена необходимость гальванической развязки аппаратуры систем и подсистем, удаленных друг от друга, и в частности бортовой и наземной (корабельной) аппаратуры системы управления, а также связей с автоматикой блоков или аппаратурой полезной нагрузки?
6. В чем основной недостаток гальванической развязки на основе оптоэлектронных пар?
7. Какие основные проблемы возникают при использовании трансформаторов для гальванической развязки?
8. В чем заключается принцип передачи парафазным кодом?

9. К какому типу интерфейсов (синхронному или асинхронному) можно отнести передачу парафазным кодом?

10. Почему при передаче парафазным кодом возникает подмагничивание трансформаторов и к чему оно приводит?

11. Как при передаче парафазным кодом формируют синхрои импульсы сопровождения бита?

12. В чем заключается основное с точки зрения использования трансформаторов преимущество интерфейса «магистрального последовательного системы электронных модулей» (ГОСТ Р52070—2003)?

13. Каков основной недостаток организации связи по ГОСТ между подсистемами и системами при передаче больших массивов данных?

3. Формирование реального времени и синхроимпульсов в БЦВС

3.1. Формирование реального времени

Реальное бортовое время является одним из важнейших параметров, определяющих точностные характеристики САУ.

При любом способе формирования реального времени в его основе лежит частота высокостабильных бортовых генераторов частоты (датчиков времени или формирователей синхроимпульсов — ФСИ), входящих в состав БЦВМ или являющихся самостоятельными устройствами в составе БЦВС [1].

Требуемая точность и стабильность частоты, формируемой генератором, достигается, как правило, использованием в его резонансном контуре кварцевого резонатора, обладающего тем свойством, что кварц как механическая колебательная система при определенном конструктивном исполнении (срезе кристалла и форме кварцевой пластины) достаточно долго сохраняет определенную частоту колебаний, которая не зависит от внешних электромагнитных и ионизирующих излучений [2]. Наибольшую погрешность в частоту колебаний вносит изменение температуры окружающей среды, для нейтрализации которой кварцевый резонатор или весь генератор помещают в пассивный (без регулирования температуры) или активный (с регулированием температуры, например подогревом) корпус (термостат)

. Подогрев возможен, так как для стабильности частоты важно не значение температуры, а ее неизменность. Кроме того, в электрическую схему генератора вводят элементы, компенсирующие уход параметров элементов генератора от темпе-

ратуры [3].

Вторым внешним фактором, к которому чувствителен кварцевый резонатор, являются механические воздействия, которые нейтрализуют конструкцией резонатора (например, подвеской кварцевой пластины на гибких держателях [4, 5].

Создание кварцевых резонаторов и генераторов на их основе является самостоятельной областью техники, в которой специализируется несколько крупных отечественных предприятий, из которых можно выделить ОАО «Морион», г. Санкт-Петербург [6]. Можно отметить, что в середине прошлого века разработка и производство кварцевых резонаторов были профильной работой нашего предприятия, обеспечивающего ими разработки и производство как военных, так и гражданских изделий отрасли и смежных отраслей.

Принципы формирования бортового времени рассмотрим с учетом поколений создания БЦВС.

В первых БЦВС (середина 60-х годов прошлого века) единый кварцевый задающий генератор (КЗГ) использовался как для формирования тактовых импульсов, обеспечивающих работу динамических триггеров, так и для формирования бортового времени, причем никаких дополнительных выходов для формирования бортового времени КЗГ не имел.

Счет реального времени велся в тактах выполнения программы, а точнее, времени цикла управления, который формировался строго из длительности всех выполняемых в цикле команд. Задачей программистов было такое построение программы, чтобы цикл содержал определенное и фиксированное количество тактов. В помощь программистам в систему команд была введена операция «траты» времени, не выполняющая никаких операций с данными, а просто отрабатывающая «впустую» заданное количество тактов. Использование траты позволяло подогнать длительность цикла под требуемое значение.

Задача формирования заданной в алгоритмах управления длительности цикла для программистов была непростой

и служила источником множества ошибок. Но этот способ был тем хорош, что для формирования реального времени не требовалось дополнительных аппаратурных затрат, а формирование обеспечивалось «на карандаше», т. е. расчетом длительности цикла на этапе разработки штатных программ с последующей проверкой при автономной и комплексной отработке. На рис. 3.1 приведен принцип формирования программного цикла управления, который жестко делился между разными задачами.

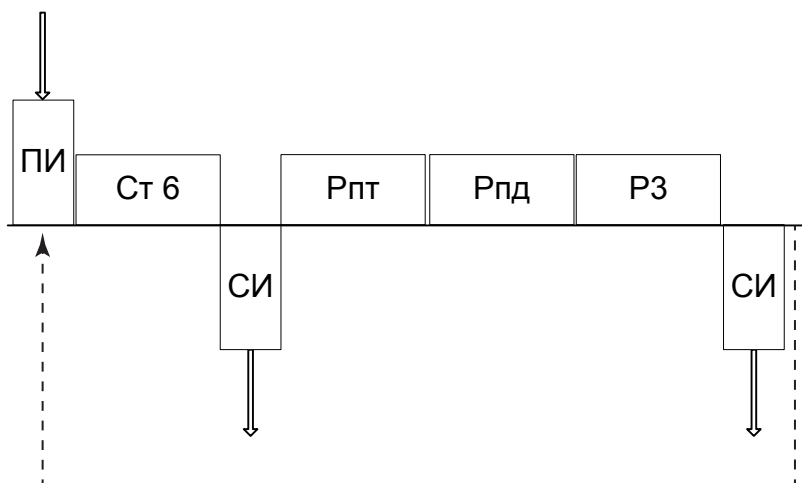


Рис 3.1. Принцип формирования программного цикла управления

Цикл начинался, как правило, с приема информации (ПИ). Затем решались так называемые быстрые задачи стабилизации (Ст6), по сути определяющие базовую длительность цикла. В навигационной задаче (НЗ) рассчитывались требуемые и фактические параметры движения центра масс изделия на данный момент (РПД). Рассчитывалась ошибка, которая как параметр передавалась в задачу расчета задания (РЗ) параметров управления, по результатам которой совместно с результатами решения задачи СТ формировался пакет управляющих данных, который выдавался на исполнительные устройства

(рулевые машинки и топливную заслонку двигателя) командами списывания информации (СИ). Этим списыванием и завершался цикл управления.

Поскольку длительность цикла была фиксирована, то при расчете НЗ в качестве параметра времени использовалось просто количество циклов, т. е. безразмерная величина с известным весом (длительностью цикла), что в свою очередь упрощало программирование и хотя бы частично компенсировало программистам решение сложной проблемы — «заталкивания» в цикл нескольких задач с разными частотами расчета.

Время показало, что жесткое планирование задач по времени не позволяет рационально использовать ресурсы БЦВМ и поэтому оказался необходим переход к гибкому планированию очередности постановки задач на решение. Проблема планирования дополнительно обострилась переходом к увеличению полноты использования резерва БЦВМ организацией параллельного счета. Кроме того, введение режимов работы с понижением частоты ФСИ при переключении модулей также потребовало независимого счета текущего времени на отдельном аппаратурном счетчике тактов [7].

При этом был реализован так называемый плавающий цикл, когда все время отводилось решению самой длинной и трудоемкой задачи с наибольшим циклом решения. Такой задачей была НЗ. Задача РПУ имела более высокую частоту и включалась по прерыванию от счетчика тактов, который был реализован как интервальный. Следующей по приоритету была задача СТ. Задача обмена прерывала все, так как имела наибольший приоритет. При этом код длительности очередного интервала счета загружался в счетчик процессором по программе операционной системы (по программе диспетчера-планировщика). Отсчитав загруженный код, счетчик формировал прерывание, по которому и включалась программа-планировщик.

Такое построение цикла с вложением задач с большей частотой решения в более «медленные» задачи заметно упростило программирование сложных задач НЗ и РПУ, так как отпала необходимость дробить их на части и по частям встраивать в цикл решения. Они программировались как непрерывные, а задача переходов по прерыванию и возвратов на прерванную программу решалась операционной системой.

Переход к счету реального времени с помощью аппаратного счетчика тактов оказался достаточно прогрессивным решением, так как заметно поднял эффективность производительность БЦВМ. Однако выявилась новая проблема, связанная с кратковременной нестабильностью длительности такта из-за особенностей резервирования задающего генератора ФСИ. Длительность такта гарантировалась только статистически с определенной вероятностью на интервале в несколько секунд. Эта нестабильность была связана с выбранным методом резервирования ФСИ, реализованного в трехканальном варианте на основе трех независимых генераторов частоты с подсинхронизацией и подфазировкой каналов формирователя один раз в такте. Такое построение было необходимо для решения проблемы ОВН в КЗГ [8]. Проблема нестабильного такта еще больше обострилась, когда с целью нейтрализации деградации параметров БИС из-за дозовых накоплений был введен режим перестройки частоты ФСИ вычислительных модулей и модулей связи по командам системного модуля [9, 10].

Все это для сохранения преимуществ гибкого цикла, применения новых методов резервирования и повышения радиационной стойкости потребовало введения датчика реального времени, независимого от системы синхронизации БЦВС, что и было сделано в магистрально-модульных системах на базе модулей «Малахит 3» и «Малахит 7». В этих системах произошел окончательный отказ от стабильных частот ФСИ модулей и переход к перестраиваемым под фактическое быстродействие модулей задающим генераторам (см. рис. 3.2).

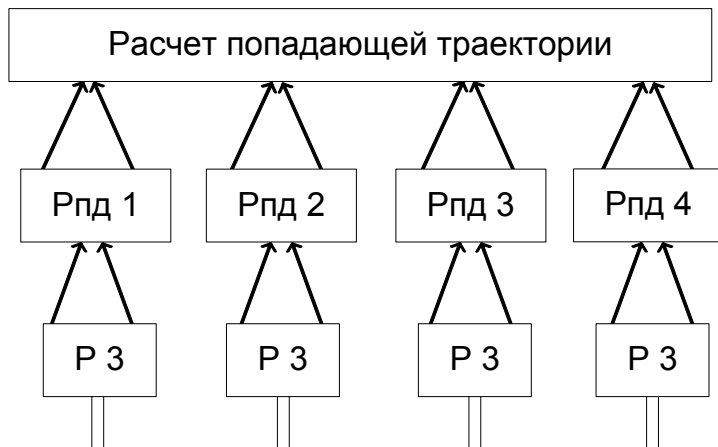


Рис. 3.2. Счет времени внешним счетчиком и прерываниями длинных задач короткими

Единственной возможностью получения реального времени оказалось применение независимого датчика времени с собственным резервированием. Причем для повышения надежности в систему устанавливалось по крайней мере два независимых датчика времени. Грубый выбор правильно работающего из них велся системным модулем на основе допускового контроля путем сравнения показаний датчиков между собой и с внутренними таймерами модулей БЦВС и периодическим тестовым контролем датчиков для точной диагностики.

Использование управляемого кодом формирователя частоты оказалось достаточно прогрессивным решением, что позволило применить его для управления напряжением импульсных источников вторичного электропитания при переходе в них от аналоговой обратной связи к цифровой [11].

В части планирования задач вопрос также был решен радикально. Задачи с различными частотами решались разными вычислительными модулями, а задачи обмена — модулями связи.

Обмен данными между задачами (модулями) ведется через общесистемную магистраль. Задачи операционной системы БЦВС, включая задачи повышения надежности, были вынесены на системный модуль, что позволило с достаточно высокой полнотой проводить автономную отладку программ, заканчивая комплексными прогонами в составе БЦВС на ЦМК и комплексных стендах.

3.2. Формирование синхроимпульсов

В основе формирования синхроимпульсов лежит частота задающего генератора, которая поступает на счетчик и после дешифратора, подключенного к выходам счетчика, запускает и сбрасывает триггеры — формирователи синхроимпульсов, обеспечивая требуемую фазу и длительность синхроимпульсов (см. рис. 3.3).

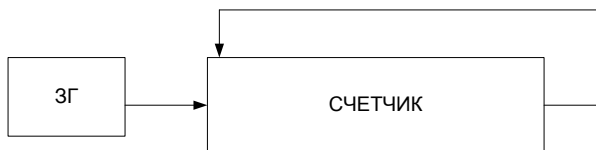


Рис. 3.3. Формирование синхроимпульсов на основе счетчика
(сдвигового регистра)

В некоторых формирователях вместо счетчика и дешифратора используют просто сдвиговый регистр, снимая сигналы, запускающие и сбрасывающие триггеры-формирователи с разных разрядов регистра.

Принципиальным отличием цифровых вычислителей от счетно-решающих аналоговых устройств является дискретный принцип переработки информации, при котором изменение состояния элементов памяти (триггеров) происходит в строго определенный дискрет времени, фиксируемый специально формируемым синхронизирующим сигналом (синхроимпульсом), только при наличии которого происходит изменение состояния элемента памяти [1].

Любая операция в процессоре БЦВМ состоит из нескольких тактов (элементарных дискретов времени), внутри которых может быть один или несколько синхроимпульсов. Для формирования этих синхроимпульсов, поступающих на цифровое устройство с определенным периодом (тактом), служат специальные устройства — формирователи синхроимпульсов (ФСИ).

Длительность такта выбирается таким образом, чтобы за время между синхроимпульсами была полностью завершена логическая обработка данных. Например, два числа, хранимые в регистрах на входе сумматора, прошли через его логические элементы и сформировали на выходе сумматора достоверный результат (сумму, разность или произведение), который будет зафиксирован в регистре результата по соответствующему более позднему синхроимпульсу. Если частота следования синхроимпульсов выбрана чрезмерно высокой, то к моменту записи результата его формирование логическими элементами, имеющими конечное быстродействие, может не закончиться и в регистр результата будет занесен недостоверный результат.

Расчет времени прохождения электрического сигнала (логического уровня) через цифровые элементы ведется по специально разрабатываемым методикам, учитывающим нормативное быстродействие элементов, заданное в их технических условиях для определенных номиналов питания и температур, а также электрофизические параметры конструкции, в которую собраны элементы.

К параметрам конструкции относятся паразитные емкости монтажа печатных плат микросборок и блоков, а также длины и взаимное расположение проводников печатных плат и межблочных связей (фактически волновое сопротивление).

Положение усугубляется тем, что на этапе разработки структуры цифрового устройства (узла, блока, процессора) неизвестны достоверные электрофизические параметры конструкции, разработка которой ведется на основе схемы электрической (СхЭ), создаваемой по структурным схемам.

В то же время вся временная диаграмма обработки данных, т. е. частота, состав и фазовые соотношения синхроимпульсов определяются именно на этапе разработки структуры, являясь ее неотъемлемой частью. Ошибки при выборе состава синхроимпульсов, их частот и фазовых соотношений приводят в итоге к созданию неработоспособного устройства, которое, прекрасно работая на этапе макетирования, оказывается неработоспособным в штатном исполнении конструкции при незначительных изменениях напряжения питания или температуры окружающей среды.

На основании опыта многих поколений разработчиков бортовой аппаратуры в НПОА был сформирован принцип «Расчет по наихудшему случаю». Этот принцип требует, чтобы на бумаге, т. е. при разработке структуры и расчете времен устройство работало при самом неблагоприятном сочетании температур (как плюсовых, так и минусовых), отклонений напряжения питания и разбросе параметров конструкции. Этот принцип является очень жестким и требует высокой квалификации разработчиков структуры, которые, кроме глубокого понимания принципов логической обработки и передачи информации, должны в совершенстве знать и понимать электрофизику работы комплектующих элементов (интегральных микросхем и БИС) и прогнозировать электрофизические характеристики основных элементов конструкции (узлов, блоков и приборов). В связи с этим становится понятной важность создания унифицированных конструктивных решений. Удачным примером решения этой задачи унификации конструкции является создание унифицированного конструктива цифровых вычислительных средств (УКЦВС) [5].

Было создано два поколения типовых конструкций — УКЦВС1 и УКЦВС2, соответственно использующих тонкопленочные и толстопленочные микросборки. Все основные параметры конструкции были зафиксированы нормативными документами — стандартами предприятия и отрасли (СТП и ОСТ).

В первую очередь унификация решила задачу подготовки производства на заводах-изготовителях отрасли, т. е. создания условий для реализации одного из основополагающих принципов обеспечения надежности, а именно хорошей технологической оснащенности и культуры производства.

Одновременно была решена и задача расчета временных параметров работы цифровых устройств (микросборок, блоков, приборов), так как в самом начале проектирования — на этапе разработки структуры — формировалась не абстрактная логическая реализация, а структура, полностью привязанная к элементной базе и соответствующему уровню конструкции (микросборке, блоку, прибору) по компоновке и выводам, что дало возможность достаточно достоверно проводить расчет быстродействия работы устройства соответствующего уровня и задать требуемые параметры синхроимпульсов, обеспечивающие работу аппаратуры при наихудшем сочетании параметров.

Можно отметить, что разработка с использованием этого принципа стала с середины прошлого века краеугольным камнем в разработках бортовой аппаратуры НПОА.

Рассмотрим формирователи синхроимпульсов первого поколения.

Основу логических блоков первых БЦВМ составляли динамические триггеры (см. рис. 3.4), являющиеся транзисторными усилителями, к базе транзисторов которых помимо резисторного делителя, задающего рабочую точку, была подключена LC-цепь как элемент памяти.

При подаче мощного импульса питающего напряжения в коллекторную цепь транзистора происходит передача состояния элемента памяти на прямой и инверсный выходы усилителя. Эти сигналы, пройдя дальнейшую логическую обработку на диодно-резисторной логике, фиксируются в элементах памяти триггеров следующего слоя. Таким образом, логическая обработка ведется только в момент действия импульса питания, который и был тактовым (синхронизирующим), что ис-

ключает «сквозной перенос» сигналов в счетчиках и сдвиговых регистрах.

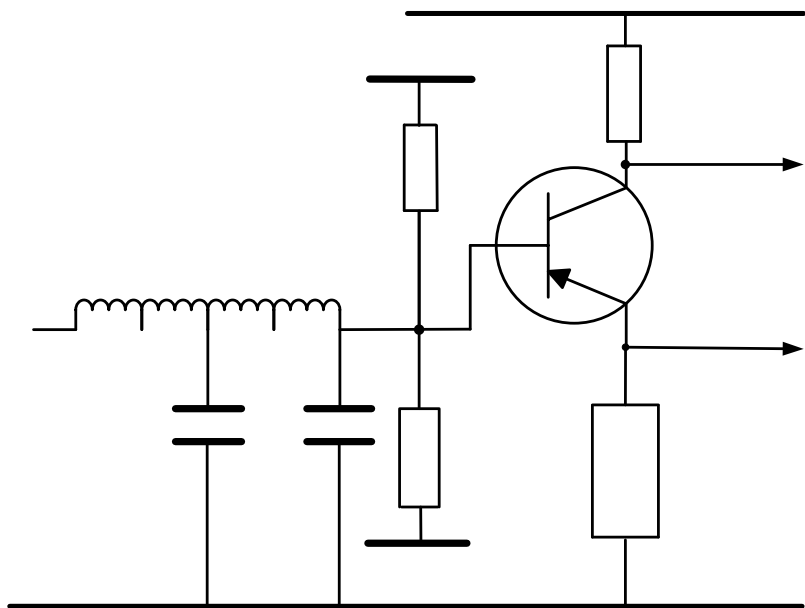


Рис. 3.4. Динамический триггер

Для формирования тактовых импульсов использовался кварцевый задающий генератор (КЗГ) с делителем частоты, дающий определяемую выбранным номиналом кварца частоту 256 КГц, удобную для деления.

Сигнал с выхода КЗГ, пройдя усилители (см. рис. 3.5), поступал на блоки в виде импульсов отрицательной полярности длительностью в 2 мкс с периодом 3,90625 мкс. Длительности импульса питания в 2 мкс было достаточно для проведения логической обработки и запоминания в следующем слое триггеров, так как блоки были достаточно компактны, а диоды и резисторы практически не вносили задержек.

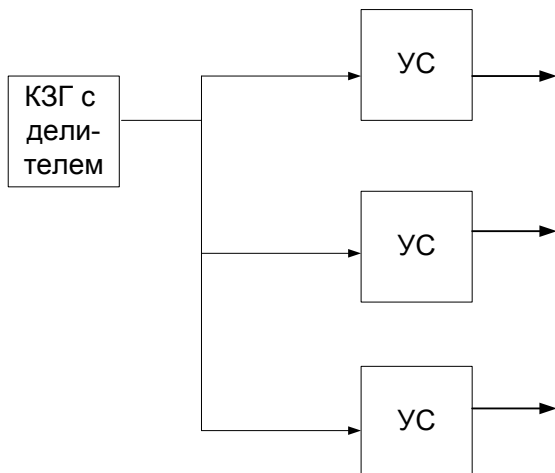


Рис. 3.5. Формирователь тактовых импульсов с единым КЗГ

При этом переработка информации велась в строго определенные дискреты длительностью в 2 мкс, отстоящие друг от друга примерно на 4 мкс, что позволяло строить достаточно сложные цифровые устройства, включая счетчики — основу устройств управления первых БЦВМ.

Формирователь, реализованный на основе единого КЗГ, успешно выполнял свою задачу, обеспечивая 3 канала БЦВМ синхронными и синфазными тактовыми импульсами, так как разбежка сигналов на усилителях не превышала единиц наносекунд. Этого было достаточно для правильной работы схем мажоритации. Однако наличие единого генератора не отвечало формальным требованиям надежности — сохранения работоспособности при одной возможной неисправности (ОВН). Решения этой проблемы длительное время найти не удавалось, тем более, что такое построение оказалось допустимым для практических применений, так как в силу малости аппаратных затрат вероятность отказа КЗГ была невелика и соответствовала требованиям к надежности первых САУ. Была предпринята попытка, используя известные решения [4], сделать генератор

резервированным путем связи колебательных контуров генераторов. Однако проверки работоспособности в диапазоне температур и питающих напряжений выявили существенную нестабильность запуска такого генератора и эти решения применения не получили.

Для следующего поколения БЦВС, реализованного на интегральных микросхемах, со статическими триггерами в основе, потребовалась многострочная синхронизация, при которой в одном такте использовались по меньшей мере 2 синхросигнала для исключения сквозных переносов в счетчиках и сдвиговых регистрах [5].

В их основе также использовался единый КЗГ, дающий частоту на формирователи синхроимпульсов (ФСИ) всех устройств и каналов. Для синхронизации и фазирования ФСИ формировался фазирующий (запускающий) ФСИ стартовый сигнал, который формировался в ДУКе следующим образом (см. рис. 3.6, 3.7).

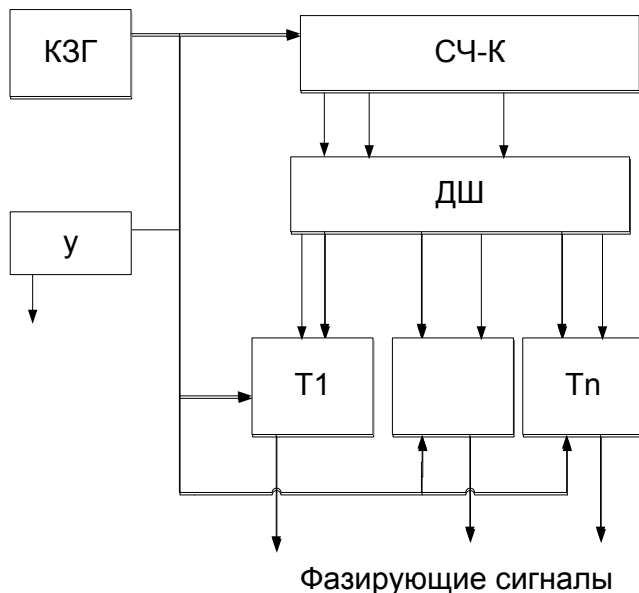


Рис. 3.6. Формирование фазирующих сигналов

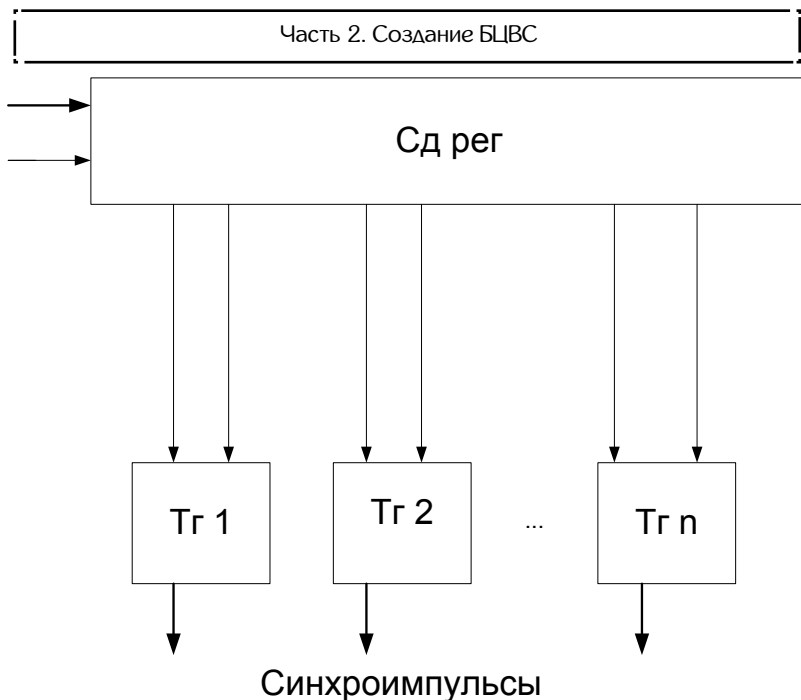


Рис. 3.7. ФСИ на сдвиговом регистре с внешним фазированием

Частота КЗГ поступала на счетчик, к выходам которого был подключен дешифратор, запускающий и сбрасывающий выходные триггеры, сигналы с которых поступали на соответствующие ФСИ, реализованные на основе сдвиговых регистров. Используя разные разряды регистра, можно было получить несколько синхроимпульсов с нужными фазовыми соотношениями. На рис. 3.7 приведена схема формирования фазирующих сигналов и ФСИ на основе сдвигового регистра, на вход которого подается высокая частота (не мене 512 МГц), а фазирующие (запускающие) сигналы и сами синхроимпульсы формируются на триггерах, запускаемых и сбрасываемых разрядами счетчика. На рис. 3.8 приведена схема ФСИ с резервированием задающих генераторов.

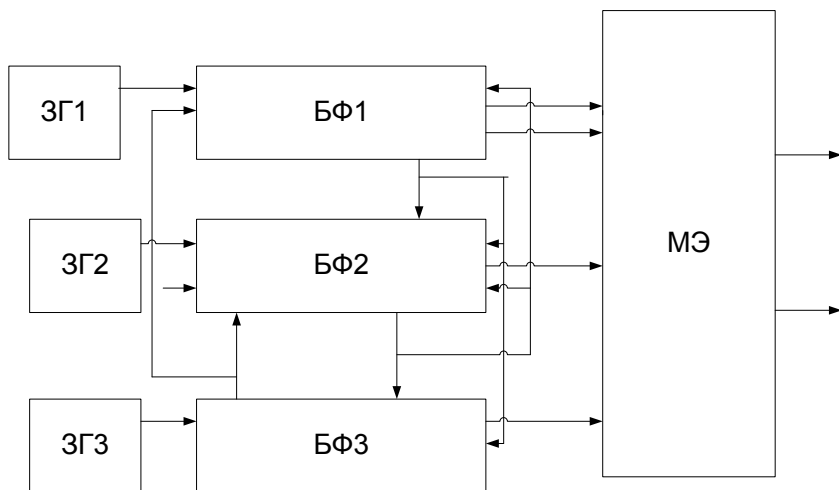


Рис. 3.8. Резервированный ФСИ

ФСИ содержит три задающих генератора (ЗГ1-ЗГ3), которые в ФСИ системного модуля кварцевые, а в остальных модулях управляются кодом. Фазировку каналов ФСИ между собой обеспечивают три блока фазирования, подключенные частотными входами к своим генераторам, а фазирующим выходом — к фазирующим входам двух других блоков.

Такое построение формирователей синхроимпульсов обеспечивало работу цифровых узлов, реализованных на статических триггерах, и требуемый уровень синхронности и синфазности работы разных каналов БЦВМ, но проблема обеспечения работоспособности системы при ОВН оставалась, и требовались новые решения при сохранении достигнутых положительных результатов. Такие решения были найдены при создании БЦВС на базе ЦВМ7 [8].

В основе этих решений было применение резервированных формирователей синхроимпульсов с использованием хорошо

знакомого принципа мажоритации сигналов. Структурная схема резервированного ФСИ приведена на рис. 3.8. Основная идея заключена в том, что используются три независимых задающих генератора (ЗГ1, ЗГ2 и ЗГ3), каждый из которых подключен к входу своего блока фазирования (БФ1, БФ2 и БФ3), которые обеспечивают взаимную фазировку начала формирования синхроимпульсов такта, а также формирование этого набора синхроимпульсов. Каждый синхроимпульс дополнительно проходит через мажоритарный элемент (МЭ).

При необходимости иметь выходы на несколько дополнительных устройств в формирователь можно было установить дополнительные мажоритарные элементы.

Основной принцип взаимного фазирования заключается в следующем. После начала работы задающего генератора его частота поступает на сдвиговый регистр (СД) и счетчик (Сч) блока фазирования. После нескольких периодов высокой частоты сигнал с выхода дешифратора (Дш), подключенного к выходам счетчика, запускает триггер останова (ТгО), сигнал с которого, поступая на запрещающий вход элемента И, останавливает прохождение частоты на сдвиговый регистр и формирование синхроимпульсов приостанавливается. Сигнал с выхода триггера останова поступает также на первый вход фазирующего мажоритара (ФМ) своего блока и на выход блока фазирования. Этот выход подключен к фазирующим входам двух других блоков фазирования. В каждом блоке входящие сигналы фазирования проходят привязку к частоте своего задающего генератора на триггерах привязки Тг-1 и Тг-2, а затем поступают на второй и третий входы ФМ, сигнал с выхода которого запускает триггер пуска (Тгп), который сбрасывает триггер останова. После чего восстанавливается поступление частоты задающего генератора на счетчик и сдвиговый регистр, в результате чего возобновляется формирование синхроимпульсов выходными триггерами (ф), каждый из которых запускается и сбрасывается соответствующим разрядом сдвигового регистра. Таким

образом, происходит как бы «притормаживание» блока, опережающего по фазе два других, на время до подхода еще одного сигнала фазирования из других блоков. Появление двух сигналов фазирования происходит одновременно во всех блоках, в которых с точностью до периода высокой частоты начинают синфазно формироваться синхроимпульсы нового такта.

Структура блока фазирования приведена на рис. 3.9, а на рис. 3.10 приведен перестраиваемый задающий генератор.

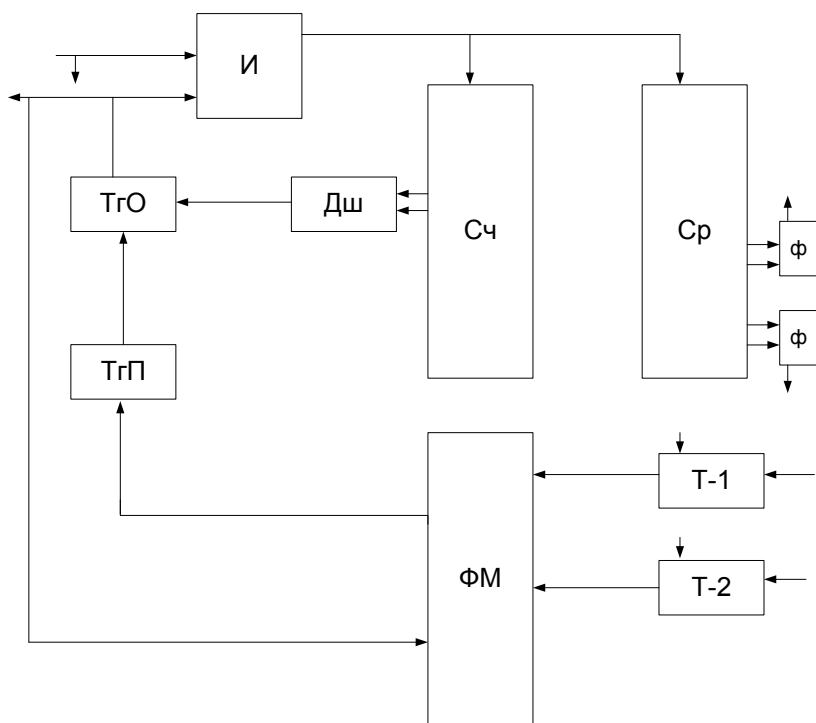


Рис. 3.9. Блок фазирования ФСИ

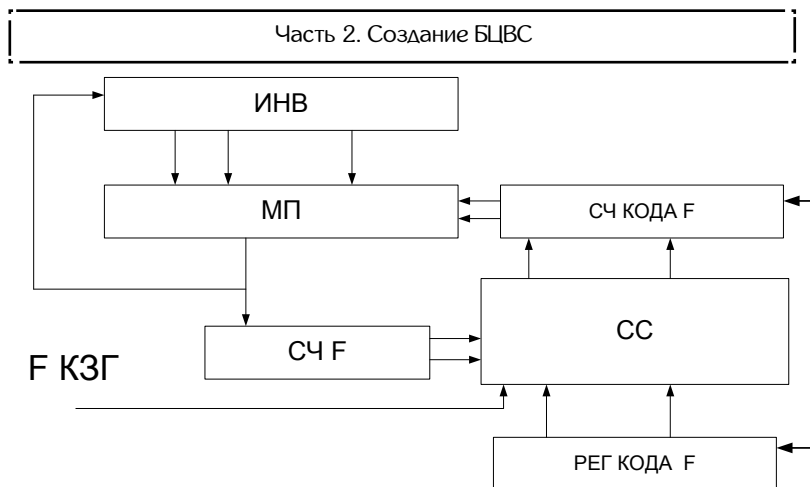


Рис. 3.10. Перестраиваемый ЗГ

Такое построение ФСИ решает проблему ОВН задающего генератора, но выдвигает свою новую проблему, которая связана с тем, что введение приостанова не позволяет к великому ужасу программистов гарантировать длительность любого такта, случайно выбранного во времени. Длительность такта оценивается только статистически на интервале работы продолжительностью в несколько секунд, что позволяет оценить только среднее быстродействие процессора и производительность.

Однако это полностью исключает использование тактовой частоты для формирования (счета) реального времени, для чего требуется независимый датчик времени.

Решение задачи сохранения работоспособности системы при изменении параметров БИС от накопленной дозы ионизирующего излучения, старения или изменения температуры окружающей среды привели к появлению достаточно революционного для традиционной реализации ФСИ решения.

В состав вычислительных модулей и модулей связи магистрально-модульных БЦВС были введены генераторы с пере-

страиваемой по командам системного модуля частотой [9], что позволяло по результатам тестовых проверок модуля установить на каждом интервале частоту, соответствующую текущему быстродействию БИС модуля.

На рис. 3.10 приведена структура перестраиваемого задающего генератора, который содержит несколько последовательно соединенных инверторов (ИНВ), подключенных выходами к входам мультиплексора (МП), выход которого является выходом генератора и подключен к счетному входу счетчика частоты (СЧФ) и входу первого инвертора, образуя тем самым кольцевой генератор. Для задания номинала частоты и ее поддержания служат регистр кода частоты и счетчик кода частоты, в которые записывается код требуемой частоты. Формируемая частота поступает на счетчик частоты, подключенный выходами к первым входам схемы сравнения (СС), инкрементный и декрементный выходы которой подключены к одноименным входам счетчика кода частоты. В случае отклонения частоты, подсчитанной счетчиком частоты, стробированным входным сигналом кварцевого задающего генератора, от кода, записанного в регистр кода частоты, подключенного ко вторым входам схемы сравнения. СС в зависимости от знака разности формирует или сигнал инкрементации, или сигнал декрементации. По этим сигналам счетчик кода частоты или увеличивает, или уменьшает код, поступающий на управляющие входы мультиплексора. Мультиплексор в соответствии с новым кодом изменяет номер подключаемого инвертора, меняя тем самым длину кольца и, следовательно, время прохождения сигнала по кольцу, т. е. выходную частоту.

Перестройка частоты позволяет с одной стороны повысить надежность работы в полях ионизирующего излучения, а с другой стороны — поднять производительность при появлении запасов по быстродействию в БИС, что является достаточно реальным, так как применяемые для повышения радиационной стойкости БИС технологические решения приводят к некоторому увеличению быстродействия на начальном участке времени набора дозы.

Можно отметить, что решения по управлению частотой оказались применимы также для управления номиналом питания ИВЭП [11] и напряжением выходного преобразователя «код — напряжение» при переходе в их реализации от аналогового контура стабилизации выходного напряжения к цифровому управлению.

Список литературы к разделу

1. Янсен Й. Курс цифровой электроники. В 4 т. Т. 4. Микрокомпьютеры / пер. с англ. М. : Мир, 1987.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / пер. с англ. М. : Мир, 1998.
3. Термостабилизированный генератор на логических элементах, управляемый напряжением : информационный листок ВИМИ. № 66—0499 М., 1986.
4. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / под ред. Шахильдяна. М. : Радио и связь, 1989.
5. Антимиров В. М. Особенности проектирования вычислительных систем на основе унифицированных конструктивов // РКТ, 1990. Сер. 11; вып. 1.
6. Генераторы частоты. Технические условия, МНЮР531.326. СПб. : Морион, 1999.
7. А. с. 187299 Н 03 К 23/00. Устройство формирования временных интервалов. Описание изобретения / В. М. Антимиров, С. А. Куприянов, В. А. Шаповалов. От 16.12.1981.
8. А. с. 867219 Н 03 К 23/00. Формирователь синхроимпульсов / В. М. Антимиров, А. Д. Мих, В. А. Шаповалов. От 20.02.1981.
9. А. с. 1221218 G 06 F 1/04. Устройство формирования импульсов / В. М. Антимиров, В. А. Шаповалов. От 29.08.1983.
10. Патент № 2442424 RU. Перестраиваемый формирователь / В. М. Антимиров. От 17.04.2012.
11. Мэк Р. Импульсные источники питания / пер. с англ. М. : Додэка XXI, 2008.

Вопросы к разделу

1. В чем заключается принципиальное отличие работы цифровых вычислителей от работы аналоговых решающих устройств?
2. Каковы основные достоинства аналоговых вычислителей?
3. Чем определяется выбор минимального времени между тактовыми синхроимпульсами?
4. Для чего в резервированных вычислительных системах с узлами мажоритации требуется синхронная и синфазная работа одноименных устройств разных каналов?
5. Какова роль единого задающего генератора при реализации формирователей синхроимпульсов вычислительных устройств с резервированием на основе принципа мажоритации?
6. Каков основной недостаток формирователей синхроимпульсов с единым задающим генератором по формальным требованиям обеспечения надежности?
7. В чем отличие работы динамического триггера с импульсным питанием от статического триггера?
8. Почему в первых БЦВМ при расчете реального времени в тактах выполнения программы для формирования тактовых импульсов использовался задающий генератор с кварцевым резонатором?
9. В чем достоинства и недостатки формирования реального времени счетом тактов программы?
10. Почему переход к формирователям синхроимпульсов с независимыми задающими генераторами и фазированием на низкой (тактовой) частоте потребовал внешнего датчика реального времени?
11. В чем достоинства и недостатки фазирования на низкой частоте?

12. Почему подстройка частоты синхронизации под текущее быстродействие элементной базы эффективна в магистрально-модульных БЦВС?

13. В чем заключается принцип кодового управления частотой генератора?

Оглавление

1. Развитие БЦВС.....	3
2. Интерфейсы.....	30
2.1. Внутримодульный синхронный параллельный интерфейс	31
2.2. Последовательный асинхронный интерфейс	36
3. Формирование реального времени и синхроимпульсов в БЦВС	48
3.1. Формирование реального времени	48
3.2. Формирование синхроимпульсов	54

Учебное издание

Антимиров Владимир Михайлович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

В 2 частях

**Часть 2
СОЗДАНИЕ БЦВС**

**Редактор *Т. Е. Мери*
Верстка *Е. В. Ровнушкиной***

Подписано в печать 05.10.2015. Формат 60×84 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 4,2.
Уч.-изд. л. 3,14. Тираж 100 экз. Заказ 343.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375–48–25, 375–46–85, 374–19–41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 350–56–64, 350–90–13
Факс: 8 (343) 358–93–06
E-mail: press-urfu@mail.ru



АНТИМИРОВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика» УрФУ, главный научный сотрудник АО «НПО автоматики».

Лауреат Государственной премии в области науки и техники за 2004 г. Автор 140 научных трудов, в том числе 2 монографий, а также 164 изобретений, в том числе 25 патентов.